



# **Sistema de control de un modulador Mach-Zehnder basado en Arduino**

**Un trabajo final de grado  
presentado a la Facultad de la  
Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de  
Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya  
por  
*Gonzalo Ramos Bernal***

**En cumplimiento parcial de los  
Requisitos para la obtención del título de grado en  
*Ingeniería de Sistemas de telecomunicaciones***

**Tutores: Josep María Fàbrega (CTTC)  
Joan Manuel Gené (UPC)**

**Barcelona, Mayo 2016**

## **Abstract**

Currently one of the main branches of telecommunications are optical communications that is the transmission of information using light beams as carrier signals. This transmission is performed by intensity modulations in optical sources (lasers) that can be achieved directly in the laser or by an external device.

At work I will focus on studying the external modulation by an optical modulator of Mach-Zehnder type, trying to get a practical way to stabilize work point thereof, with the aim of establishing a point known work, and keep it all the time it will use the modulator. This will lead to greater security in data working with the modulator without the need of having to calibrate the instrument from time to time or having to be considering new work points each time, already very fluctuating, work point Mach-Zehnder vary.

## **Resum**

Actualment una de les principals branques de les telecomunicacions son les comunicacions òptiques, es a dir transmetre informació utilitzant feixes de llum con senyals portadores. Aquesta transmissió es realitza mitjançant modulacions de intensitat en les fonts òptiques (làsers) que es poden aconseguir directament en el làser o mitjançant un dispositiu extern.

En el treball em centraré a estudiar la modulació externa mitjançant un modulador òptic del tipus Mach-Zehnder, tractant d'aconseguir una forma pràctica d'estabilitzar el punt de treball del mateix, amb l'objectiu d'establir un punt de treball conegut i mantenir-ho fix durant tot el temps que es vagi a utilitzar el modulador. Això comportarà una major seguretat en les dades obtingudes treballant amb el modulador sense la necessitat d'haver d'estar considerant nous punts de treballa cada vegada que el, ja de per si mateixa molt fluctuant, punt de treball del Mach-Zehnder variï.

## **Resumen**

Actualmente una de las principales ramas de las telecomunicaciones son las comunicaciones ópticas, es decir transmitir información utilizando haces de luz como señales portadoras. Esta transmisión se realiza mediante modulaciones de intensidad en las fuentes ópticas (láseres) que se pueden conseguir directamente en el láser o mediante un dispositivo externo.

En el trabajo me centraré en estudiar la modulación externa mediante un modulador óptico del tipo Mach-Zehnder, tratando de conseguir una forma práctica de estabilizar el punto de trabajo del mismo, con el objetivo de establecer un punto de trabajo conocido y mantenerlo fijo durante todo el tiempo que se vaya a utilizar el modulador. Esto conllevará una mayor seguridad en los datos obtenidos trabajando con el modulador sin la necesidad de tener que estar calibrando el instrumento cada cierto tiempo o tener que estar considerando nuevos puntos de trabajo cada vez que el, ya de por sí muy fluctuante, punto de trabajo del Mach-Zehnder varíe.

## **Agradecimientos**

Quisiera dar las gracias a mi tutor, Josep María Fàbrega, por el inmenso apoyo que me brindó, tanto antes de emprender el proyecto, como durante el desarrollo del mismo, sin el cual esto no habría sido posible.

A Joan Manuel Gene, por facilitarme las tareas para la realización del trabajo.

Y finalmente a las personas del *Centre tecnològic de telecomunicacions de Catalunya*, en especial a Javier, por abrirme las puertas del lugar, ayudarme en los inicios y hacer mi estancia en el centro amena y agradable.

## Historial de revisiones

Revisión	Fecha	Motivo
0	18/01/2016	Creación del documento
1	06/05/2016	Primera revisión
2	9/05/2016	Corrección del trabajo
3	12/05/2016	Revisión final
4	12/05/2016	Presentación del documento

Lista de distribución del documento

Nombre	e-mail
Gonzalo Ramos Bernal	ramos.bernal.gonzalo@gmail.com
Josep Maria Fàbrega	jmfabrega@cttc.es
Joan Manuel Genè	joan.gene@upc.edu

Escrito por:		Revisado y aprobado por:	
Fecha	18/01/2016	Fecha	12/05/2016
Nombre	Gonzalo Ramos Bernal	Nombre	Josep Maria Fàbrega
Posición	Autor del proyecto	Posición	Supervisor del proyecto

## **Tabla de contenidos**

Abstract .....	1
Resum .....	2
Resumen .....	3
Agradecimientos .....	4
Historial de revisiones .....	5
Tabla de contenidos .....	6
Lista de figuras .....	8
1. Introducción .....	9
1.1. Visión del proyecto y objetivos .....	9
1.2. Requisitos del proyecto .....	9
1.3. Trasfondo del proyecto .....	9
1.4. Plan de trabajo .....	9
1.5. Paquetes de trabajo, hitos y diagrama de Gantt .....	11
1.5.1. Paquetes de trabajo .....	11
1.5.2. Hitos .....	12
1.5.3. Diagrama de Gantt .....	13
1.6. Incidencias .....	13
2. Estado del arte de la tecnología utilizada en el proyecto .....	15
2.1.1. Modulación OOK (On-Off Keying) .....	15
2.1.2. Modulación mediante conmutación de ganancia .....	16
2.1.3. Modulación en pequeña señal .....	16
2.1.4. Modulación externa de intensidad .....	17
2.2. Modulador Mach-Zehnder .....	18
2.3. Técnicas de control del punto de trabajo del modulador Mach-Zehnder .....	21
2.3.1. Técnica de control para cualquier punto de polarización en un MZM .....	21
3. Metodología .....	23
3.1. Visualización de la implementación .....	23
3.2. Hardware .....	25
3.2.1. Diseño de la red de adaptación .....	25
3.2.2. Pruebas de la red de adaptación .....	27
3.2.3. Implementación en placa sólida .....	29
3.3. Software .....	30

3.3.1.	Algoritmo y pseudocódigo .....	30
3.3.2.	Implementación en lenguaje <i>Processing</i> . ....	32
3.3.3.	Pruebas con el modulador Mach-Zehnder .....	33
4.	Resultados .....	35
5.	Conclusiones y futuro desarrollo:.....	39
	Bibliografía .....	40
	Glosario .....	41
	Anexo 1 - Estado del arte - Técnicas de control del punto de trabajo	
	Anexo 2 - Esquema completo del sistema implementado	
	Anexo 3 - Código para la placa Arduino	



## **Lista de figuras**

Figura 1 - Estructura de los grupos de trabajo .....	10
Figura 2 - Diagrama de Gantt .....	13
Figura 3 - Esquema básico de transmisión óptica.....	15
Figura 4 - Modulació OOK .....	16
Figura 5 - Función de transferencia de un modulador óptico para diferentes valores de polarización .....	17
Figura 6 - Funcionamiento de un interferómetro [2] .....	19
Figura 7 - Comportamiento del campo eléctrico a través del modulador Mach-Zehnder. 19	
Figura 8 - Esquema del MZM configurado en single-drive (izquierda) y en dual-drive (derecha). [2] .....	19
Figura 9 - Función de transferencia del modulador Mach-Zehnder .....	21
Figura 10 - Caracterización de potencia a la salida, amplitud de la señal de dithering y parámetro R .....	23
Figura 11 - Evolución de la amplitud del dithering en función del punto de trabajo .....	24
Figura 12 - Trabajo realizado correspondiente a la parte Hardware.....	25
Figura 13 - Circuito de entrada a la placa Arduino .....	26
Figura 14 - Circuito de salida de la placa Arduino.....	26
Figura 15 - Montaje de la red de adaptación en la protoboard .....	28
Figura 16 - Red de adaptación finalizada y conexión con la placa Arduino.....	29
Figura 17 – Tareas correspondientes a la parte Software.....	30
Figura 18 - Algoritmo para el sistema de control.....	31
Figura 19 - Método de decisión y corrección .....	33
Figura 20 - Esquema del montaje experimental.....	33
Figura 21 - Curvas capturadas antes y después de procesarlas.....	34
Figura 22 - Circuito de trabajo, con el modulador Mach-Zehnder de Photline (I), la placa Arduino (II) y la red de adaptación diseñada (III). .....	35
Figura 23 - Variación de la función de transferencia en un modulador Mach-Zehnder....	36
Figura 24 - Señales capturadas con el sistema de control en funcionamiento .....	37
Figura 25 - Variaciones máxima (izquierda) y mínima (derecha) de las variaciones en los valores de salida del MZM.....	37
Figura 26- Variación en las medidas con el sistema implementado (superior) y sin el sistema de control (inferior) .....	38

## 1. Introducción

En este apartado se explicará cómo se planteó el proyecto, las metas a alcanzar y el plan de trabajo marcado para lograrlo así como las variaciones que sufrió el mismo, además de los fundamentos teóricos en los que se basó.

### 1.1. Visión del proyecto y objetivos

El proyecto se desarrolló en el *Centre tecnològic de telecomunicacions de Catalunya* (CTTC) en el grupo de *Communication Networks*, llevando a cabo las pruebas y el testeo del sistema de control en los laboratorios del mismo.

El trabajo consiste en implementar un sistema de control del punto de trabajo para un modulador Mach-Zehnder, siguiendo la propuesta planteada por Yupeng Li, Yangan Zhang, y Yongqing Huang en un artículo publicado en la sociedad de *Photonics technology letters* del *Institut of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* [1]. Con este sistema se plantea lograr que el punto del trabajo del modulador sea el que se desee y, que no solo trabaje en los puntos predeterminados (máximo, mínimo, y en los intermedios de ambos, tanto en flanco de subida como de bajada) con el objetivo de optimizar las prestaciones del mismo. La adquisición y análisis de datos se llevarán a cabo utilizando el sistema Arduino.

Los objetivos principales del proyecto son:

- 1.- Avanzar en el conocimiento de sistemas avanzados de comunicaciones.
- 2.- Diseñar tanto la parte software como hardware del sistema de control.
3. Conseguir una implementación funcional del mismo.

### 1.2. Requisitos del proyecto

Los requisitos que el prototipo a diseñar e implementar debe cumplir son:

- Debe ser un sistema eficiente y sencillo.
- Controlar correctamente el punto de trabajo del modulador Mach-Zehnder.
- Debe poder establecer el punto de trabajo en cualquier valor deseado de la función de transferencia del modulador, no solo en las cuatro zonas comunes (pico, nulo y punto de cuadratura ascendente y descendente).

### 1.3. Trasfondo del proyecto

En los comienzos del proyecto, se habló con el tutor sobre el estado en el que se encuentran los trabajos con los moduladores ópticos y se indicó que el trabajo a realizar comenzaría de cero, sirviendo como base a futuros proyectos, tanto en colaboración con la universidad como internos del CTTC.

### 1.4. Plan de trabajo

A continuación se hablará del plan de trabajo establecido en el inicio del proyecto para posteriormente comentar los cambios que se fueron realizando a medida que se desarrollaba el mismo.

Una vez fijados los requisitos del proyecto, se decidió abordar la elaboración del mismo dividiendo el trabajo en 4 partes, mediante las cuales se pretende alcanzar ciertos objetivos:

- **Hardware:** A la hora de interconectar varios componentes, es necesario comprobar la compatibilidad de sus respectivas entradas y salidas; con este fin se ha observado la necesidad de diseñar circuitos de acondicionamiento para adaptar las señales de salida de un instrumento a la entrada de otro.
- **Software:** Una vez se tengan las señales adaptadas y se pueda trabajar libremente con ellas, es necesario procesarlas para así poder obtener los resultados que se desean.
- **Test y experimentación:** Cuando se hayan alcanzado los objetivos anteriores, se pasará a la parte más importante del trabajo: la prueba experimental, en la que se someterá el sistema deseado a varias pruebas con el fin de comprobar su correcto funcionamiento y solventar los posibles problemas o fallos que puedan surgir.
- **Escritura de la memoria y preparación de la presentación:** La parte final del trabajo. La memoria se irá completando a medida que se alcancen los objetivos ya mencionados, redactando el trabajo hecho y comentando la forma en la que se abordó cada objetivo planteado. En lo que se refiere a la presentación, se hará una vez se hayan cumplido todos los objetivos ya mencionados y contará con un informe visual de los resultados obtenidos además de todo dato que se considere importante de cara al fácil entendimiento de todo el trabajo realizado.

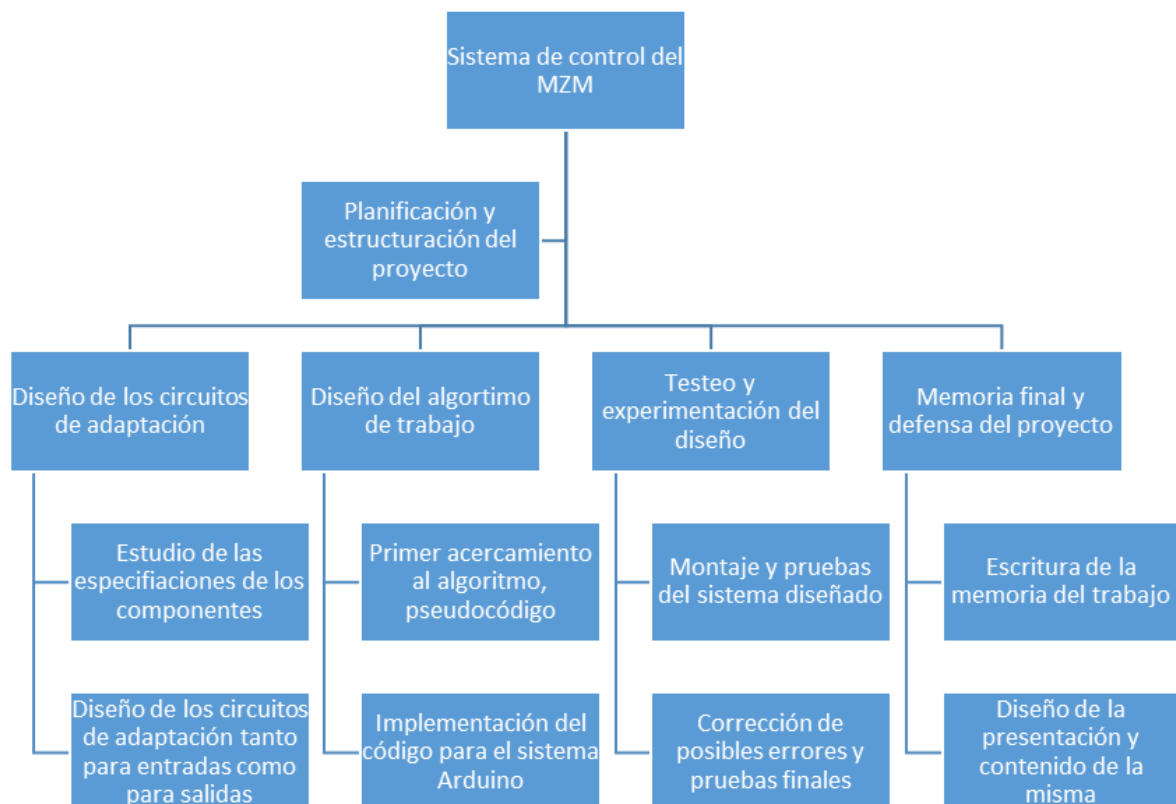


Figura 1 - Estructura de los grupos de trabajo

## 1.5. Paquetes de trabajo, hitos y diagrama de Gantt

En la figura 1 se observaba la forma en la que se distribuyó el trabajo, a continuación se explicará de que constaba cada uno de los grupos, además del espacio temporal que se asignó a cada uno y los hitos que se produjeron durante los mismos.

### 1.5.1. Paquetes de trabajo

Proyecto: Sistema de control para moduladores Mach-Zehnder	Paq. ref: PT1	
Constituyente principal: Hardware	Paquete 1 de 4	
Descripción breve: Diseño de los circuitos de acondicionamiento necesarios para la interconexión de los diferentes componentes del sistema a implementar.	Inicio planeado:22/10/2015 Finalización planeada:4/12/2015	
	Inicio del evento:22/10/2015 Finalización del evento:8/12/2015	
<p>Tarea interna T1 - Diseño de los circuitos: Considerando los parámetros de trabajo del modulador, fotodiodo y placa Arduino, diseñar los circuitos necesarios para acondicionar las señales con las que se vaya a trabajar.</p> <p>Tarea interna T2 - Listado de componentes necesarios: Descripción y presupuesto de cada uno de los componentes necesarios para la realización de los módulos de acondicionamiento.</p>	Entregables: Lista de componentes	Fecha: 22/10/2015

Proyecto: Sistema de control para moduladores Mach-Zehnder	Paq. ref: PT2	
Constituyente principal: Software	Paquete 2 de 4	
Descripción breve: Diseñar el algoritmo de trabajo que se ejecutará en la placa Arduino con tal de obtener los resultados deseados para el sistema de control del modulador.	Inicio planeado:19/10/2015 Finalización planeada:4/12/2015	
	Inicio del evento:19/10/2015 Finalización del evento:11/12/2015	
<p>Tarea interna T1 - Pseudocódigo del algoritmo: Primer acercamiento al código a implementar.</p> <p>Tarea interna T2 - Caracterización de la respuesta de los moduladores</p> <p>Tarea interna T3 - Implementación del código en el sistema Arduino</p>	Entregables: Pseudocódigo	Fecha: 01/11/2015

Proyecto: Sistema de control para moduladores Mach-Zehnder	Paq. ref: PT3	
Constituyente principal: Test	Paquete 3 de 4	
Descripción breve: Montaje, puesta en marcha y testeo del sistema íntegro para comprobar su funcionamiento y fiabilidad además de corregir posibles errores.	Inicio planeado:23/11/2015 Finalización planeada:20/12/2015	
	Inicio del evento:30/11/2015 Finalización del evento:25/04/2016	
Tarea interna T1 - Montaje del sistema en protoboard Tarea interna T2 - Montaje del sistema en estructura final Tarea interna T3 - Testeo de todo el sistema	Entregables: Ninguno	Fecha: -

Proyecto: Sistema de control para moduladores Mach-Zehnder	Paq. ref: PT4	
Constituyente principal: Memoria y presentación	Paquete 4 de 4	
Descripción breve: Redactar la memoria del trabajo además de la presentación necesaria para la posterior exposición y defensa del mismo	Inicio planeado:23/11/2015 Finalización planeada:20/12/2015	
	Inicio del evento:21/12/2015 Finalización del evento:06/05/2016	
Tarea interna T1 - Escritura de la memoria. Tarea interna T2 - Contenido de la exposición Tarea interna T3 - Presentación gráfica.	Entregables: - Memoria -Presentación	Fecha: - 06/05/2016 - 06/05/2016

### 1.5.2. Hitos

Los hitos de los que se hablará a continuación se corresponden con los puntos claves que marcaron el desarrollo del trabajo, tales como los entregables importantes así como la presentación final del mismo. En ellos no se incluyen los documentos “*Propuesta de trabajo*” y “*Revisión crítica*” ya que ambos son documentos de seguimiento y no son objetivos que se tengan que alcanzar.

PT#	Tarea#	Título	Entregable	Fecha
1	2	Listado de componentes	Lista de compra componentes	19/10/2015
2	1	Pseudocódigo	Algoritmo inicial	17/11/2015
2	3	Algoritmo a implementar	Código de Arduino	15/12/2015
3	1	Prototipo de circuitos de acondicionamiento de la señal	Prototipo de circuitos	23/12/2016
3	1	Prototipo completo del sistema de control propuesto	Prototipo funcional de sistema de control	25/04/2016
4	1	Memoria proyecto	Reporte Final	06/05/2016
4	3	Presentación	Presentación gráfica	06/05/2016

### 1.5.3. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt es un gráfico cuya función es meramente organizativa, por tanto en él únicamente constan las fechas de inicio y finalización planeadas, ya que las reales no pueden ser previstas y por tanto no forman parte de esta función organizativa.

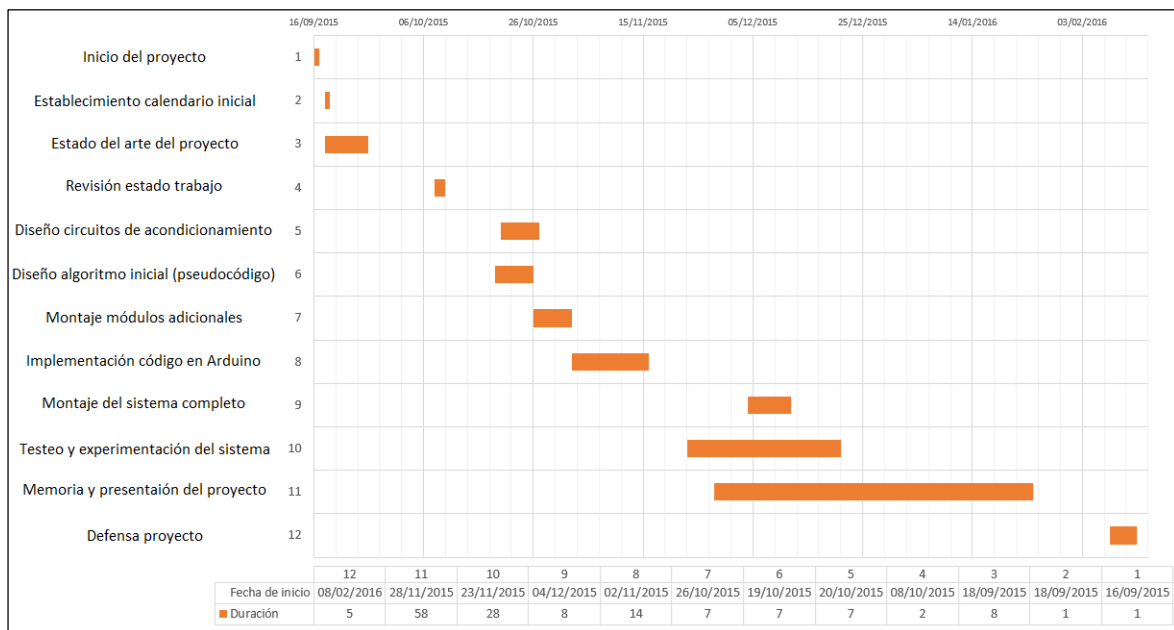


Figura 2 - Diagrama de Gantt

### 1.6. Incidencias

En los paquetes de trabajo se pueden observar diferencias entre algunas de las fechas, tanto de inicio como de finalización, planeadas y las reales, lo cual es debido a inconvenientes que fueron surgiendo durante el desarrollo del mismo, y los cuales se explicarán a continuación.

- Paquete de trabajo PT1 y PT2, Hardware y Software: Ambos paquetes de trabajo presentaron obstáculos similares, principalmente la necesidad de recopilar mucha información previa para entender correctamente los requisitos, tanto del modulador como de la placa Arduino, lo que provocó que su desarrollo llevara más tiempo del previsto inicialmente.
- Paquete de trabajo PT3, Test: En el momento de plantear el calendario de trabajo, tanto el tutor del trabajo como yo, fuimos conscientes de que esta sería la parte más larga y ardua del trabajo, ya que siendo el objetivo del proyecto contar con un prototipo funcional al final del mismo, la parte práctica y experimental del mismo debía ser la principal y por tanto la que más incidencias podía presentar y así fue. Dejando de lado contratiempos típicos como una necesaria batería de ejercicios de prueba y error para encontrar los valores óptimos de componentes (en función de aquellos de los que se disponía) y las múltiples versiones de código que iban siendo corregidas y mejoradas cada vez que planteaban un error, la principal incidencia se dio al pasar del circuito montado en la placa de prototipado (protoboard). Durante las pruebas en la protoboard se consiguió el resultado deseado, tanto la red de adaptación como el código del programa funcionaban correctamente y cumplían con su objetivo, al menos la mayoría de veces, ya que debido al montaje superficial en la protoboard, algunos componentes no hacían contacto correctamente o un ligero movimiento provocaba que se desplazaran y se tocaran entre ellos provocando cortocircuitos indeseados, por tanto se consideró que con los resultados positivos obtenidos en el resto de pruebas ya era suficiente para pasar al modelo final y estable del circuito, es decir soldar los componentes en una placa. Sin embargo, al momento de realizar las comprobaciones pertinentes antes de realizar ninguna conexión, se comprobó que a la entrada de algunos operacionales existía una señal de forma cuadrada que no debía existir. Por este motivo se revisó intensivamente el trabajo realizado, se revisaron los componentes uno por uno, se volvió a plantear el circuito realizando nuevamente pruebas individuales de cada uno de los elementos que lo conformaban, pasando a revisar las soldaduras de la placa y probando nuevas configuraciones posibles, encontrando el causante en una oscilación de los componentes que se podía solucionar introduciendo un capacitor a las entradas de los operacionales en conflicto, sin embargo se observó que el problema también se solucionaba conectando entradas adaptadas entre los pines de comunicación del mismo circuito con la placa Arduino y el Mach-Zehnder, y ya que según especificaciones de los mismo, esta condición siempre se cumplía se decidió optar por la misma obteniendo los resultados deseados y una completa funcionalidad del circuito.
- Paquete de trabajo PT4, Memoria y presentación: La principal incidencia que se presentó a la hora de desarrollar estos apartados del trabajo, fue la necesidad de solicitar la ampliación en la presentación del trabajo, por lo demás, se siguió el calendario de trabajo siempre dentro de los límites que las nuevas fechas permitieron.

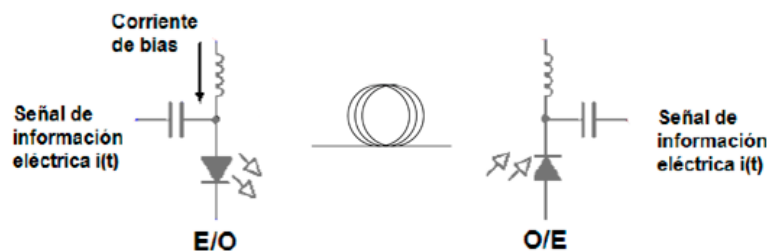


## 2. Estado del arte de la tecnología utilizada en el proyecto

Para el desarrollo del trabajo, se comenzó ampliando y profundizando el conocimiento de las áreas que intervienen en el mismo, es decir en las comunicaciones ópticas, haciendo hincapié en los tipos de modulaciones además de en el propio modulador Mach-Zehnder.

Para transmitir información a través de un sistema óptico es necesario modular una propiedad de la señal portador con la señal de información. Esta propiedad puede ser la intensidad, la fase, la frecuencia o la polarización de la misma.

La manera más común de realizarla es mediante la modulación de intensidad, es decir, la fuente de luz es modulada por la corriente de información inyectada junto con la corriente de polarización en el diodo láser, mientras que en el receptor, el detector óptico convertirá directamente la potencia óptica recibida en corriente eléctrica utilizando fotodiodos PIN o de avalancha (APD), a este proceso se lo denomina modulación de intensidad y detección directa (*IM-DD*), siendo la figura 3 un esquema básico de este sistema.



*Figura 3 - Esquema básico de transmisión óptica*

En esta sección revisaré los principales métodos y tecnologías de modulación de la portadora óptica centrándome principalmente en la modulación externa, dentro de la cual se encuentran ubicados los moduladores Mach-Zehnder, el tipo de modulador con el que se desarrolló todo el proyecto.

### 2.1.1. Modulación OOK (On-Off Keying)

Es la forma más simple de modulación y consiste en encender y apagar la fuente de luz (ya sea un LED o un láser) rápidamente con el objetivo de que en presencia de luz el sistema entienda que se ha transmitido una señal binaria correspondiente con el símbolo "1" y cuando la fuente de luz se encuentra apagada se entienda la transmisión de un símbolo "0". Siendo precisos, la transmisión tanto del valor "1" como del valor "0" vienen fijados en relación a una tensión umbral, correspondiendo el valor "1" a valores de intensidad superiores a dicho valor mientras que el "0" se corresponde con valores inferiores a dicha intensidad. Ambos valores se conocen como  $I_{on}$ , la que determina la potencia óptica que será emitida, y la inferior se denomina  $I_{off}$ .

En la figura 4 se observa un ejemplo de esta modulación. Al comienzo de cada pulso óptico aparecen algunas oscilaciones amortiguadas cuyo origen está en el proceso por el cual los portadores y fotones tienen a sus valores de equilibrio.



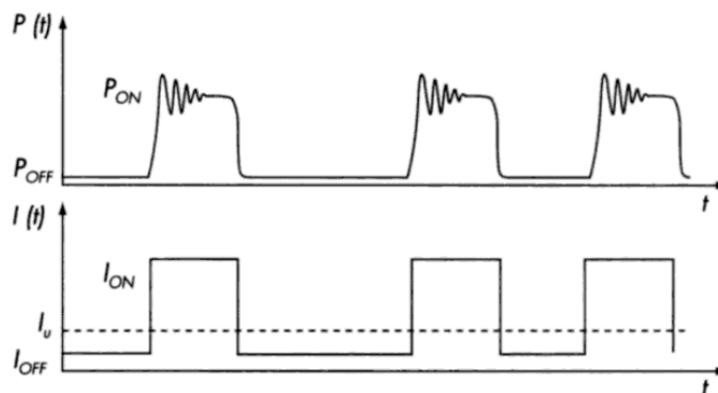


Figura 4 - Modulación OOK

El principal problema de esta técnica es que conforme la velocidad con que se enciende y apaga la fuente de luz aumenta, la luz tiende a cambiar debido a la dependencia del índice de refracción del material semiconductor del láser en la región activa con mayor número de portadores inyectados. El aumento de la corriente inyectada hace crecer la densidad de portadores, lo que hace caer el índice de refracción y, por lo tanto, la potencia y componentes espectrales (efecto conocido como *chirp*, expansión del espectro óptico) del pulso emitido, de manera que en el receptor la luz que llega es menos clara y hace difícil una detección precisa.

Es por esto que para velocidades de transmisión elevadas, es decir altas frecuencias, es necesario realizar la modulación con dispositivos independientes al láser, lo que se denomina modulación externa.

La velocidad máxima a la que se puede modular una fuente óptica depende principalmente del tipo de recombinación de los portadores, así como de las capacidades asociadas al semiconductor. Los dispositivos láser que se encuentran comúnmente en el mercado tienen una velocidad máxima cercana a los 10Gbps, que se corresponde a la capacidad de un canal de multiplexado compacto por división en longitudes de onda.

### 2.1.2. Modulación mediante conmutación de ganancia

Algunas aplicaciones ópticas que tienen al láser como fuente requieren la emisión de la potencia en forma de una secuencia de pulsos luminosos de corta duración, generalmente menor que el intervalo entre pulsos consecutivos.

Por tanto, cuando se requiere la emisión de un pulso de estas características, se aplica al láser un pulso de corriente que le hace conmutar durante un breve intervalo de tiempo, desde una situación por debajo del umbral a una por encima. Si el pulso de corriente es suficientemente corto, la emisión consiste en un único pulso luminoso que corresponde al primer pico de las oscilaciones de relajación. Al igual que con la modulación OOK se tienen problemas para altas velocidades de transmisión con lo que también es necesario una modulación externa.

### 2.1.3. Modulación en pequeña señal

En este formato de modulación, al láser le son aplicadas variaciones de corriente de pequeña amplitud alrededor de un valor de polarización, consiguiendo la emisión de una potencia que lleva esas mismas variaciones.

Para esto resulta necesario conocer la respuesta frecuencial del láser utilizado, pues ella dictará los límites de frecuencia, tanto máxima como mínima, y las condiciones bajo las cuales es posible este tipo de modulación sin que la potencia emitida presente distorsión.

Considerando que la respuesta frecuencial de un láser se define como la relación entre la amplitud de la densidad de fotones y la amplitud de las variaciones de corriente, es posible obtener, como ejemplo, la figura 5.

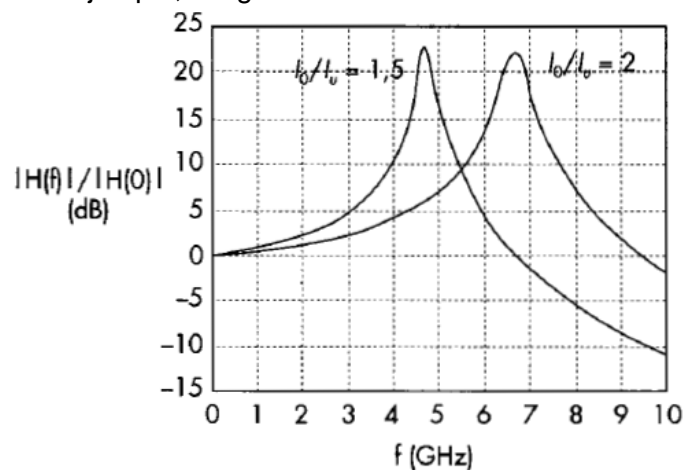


Figura 5 - Función de transferencia de un modulador óptico para diferentes valores de polarización

Como se puede observar se trata de una gráfica normalizada y para dos valores diferentes de corriente de polarización, con lo que podemos extraer dos conclusiones

- Se observa que para frecuencias elevadas la potencia transmitida será extremadamente baja, por lo tanto susceptible de presentar distorsiones.
- El láser está optimizado para obtener las mejores condiciones de transmisión a una determinada frecuencia para una determinada corriente de polarización, con lo que conseguir un valor estable de la misma es algo sumamente importante para que el láser trabaje en condiciones óptimas

En los tres modelos mencionados anteriormente, se observa que la modulación de intensidad induce sobre la señal pulsada un *chirp* no controlado limitando tanto su distancia de propagación como las velocidades que pueden soportar. La utilización de un modulador externo de amplitud generalmente provee de una mejor calidad a la señal generada y llega a velocidades de transmisión donde la modulación directa se queda corta, lo que convierte a estos dispositivos en elementos fundamentales en las redes ópticas de alta capacidad.

#### 2.1.4. Modulación externa de intensidad

Los modelos de los que se habló anteriormente, de modulación directa, además de ser sencillos y realizables a un costo económico bajo, se adaptan muy bien a aplicaciones de bajo coste y distancias y velocidades de transmisión moderadas. Sin embargo una de las principales ventajas de utilizar la luz como método de transmisión es poder utilizar el gran ancho de banda que ofrece para poder trabajar a velocidades altas con bajas pérdidas y distorsiones, lo que implica poder trabajar con grandes distancias, a cambio de recurrir a métodos de transmisión y recepción más complejos, es decir a la modulación externa.

Frente a la modulación directa de la fuente óptica, el láser, la aparición de los moduladores ópticos significó un avance importante en este ámbito de las telecomunicaciones.

Un modulador óptico es un dispositivo que se utiliza para modular un haz de luz. El haz se puede formar en el espacio libre o propagarse a través de una guía de ondas ópticas. Dependiendo del parámetro del haz de luz que se manipula, los moduladores se pueden clasificar en moduladores de amplitud, moduladores de fase, moduladores de polarización o moduladores de intensidad.

Las principales ventajas que estos instrumentos presentan son las siguientes:

- Permite que la fuente óptica funcione con un nivel constante de alimentación con lo que se prolonga su vida media.
- Se consigue una mayor velocidad de modulación, puesto que no se basa en movimiento de electrones en el diodo semiconductor.
- Se reduce la modulación de fase residual, el *chirp* mencionado anteriormente, que tiene efectos indeseados en la transmisión.

Los moduladores ópticos se basan en la variación que sufren las propiedades de un material con la aplicación de determinadas señales de distintas naturaleza. Los dos tipos más empleados son los electroópticos (EOM) y los de electroabsorción (EAM). En los primeros es una señal eléctrica la que origina un cambio en el índice de refracción del material. Los segundos están basados en la absorción de luz cuando esta atraviesa un semiconductor y sobre esta actúa un campo eléctrico.

Los moduladores más extendidos tanto por sus prestaciones técnicas como por su economía de diseño con los de tipo electroóptico, y dentro de este grupo es donde se sitúan los moduladores Mach-Zehnder, con los que se trabajó durante el desarrollo del proyecto.

## **2.2. Modulador Mach-Zehnder**

El modulador óptico Mach-Zehnder (MZM) es un interferómetro, es decir un dispositivo que basa su operación en el fenómeno de la interferencia entre ondas. En un interferómetro la señal de entrada es dividida en dos partes iguales, a cada una de las cuales se hace recorrer un camino óptico distinto (a través de los brazos del interferómetro), para después volverlas a combinar. Si la diferencia de fases entre los caminos ópticos recorridos es nula, a la salida se produce una interferencia constructiva entre las señales, recuperándose la misma señal de entrada (con lo que se genera una señal correspondiente a un bit "1"). Por el contrario, si la diferencia de fases es igual a  $\pi$ , las señales interfieren de forma destructiva y a la salida no se obtiene señal (generación de un bit "0"). Tal como se muestra en la figura 6.

Por otra parte, la variación de fases de las ondas incidentes basa su funcionamiento en el fenómeno electroóptico, por ejemplo, del cristal de niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ). Ese efecto provoca que toda señal óptica que viaje por el cristal sea sensible a un índice de refracción cuyo valor depende del campo eléctrico aplicado sobre el mismo, con lo que se consigue que la fase de la señal óptica siga las variaciones de este campo eléctrico, como se puede observar en la figura 7.

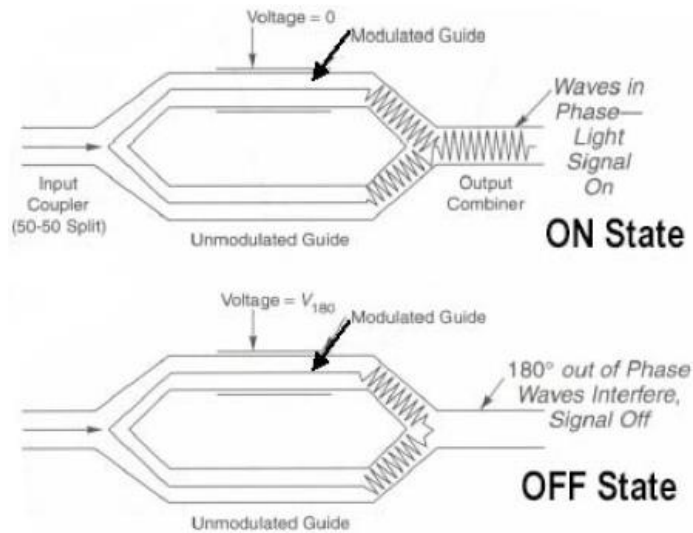


Figura 6 – Funcionamiento de un interferómetro. [2]

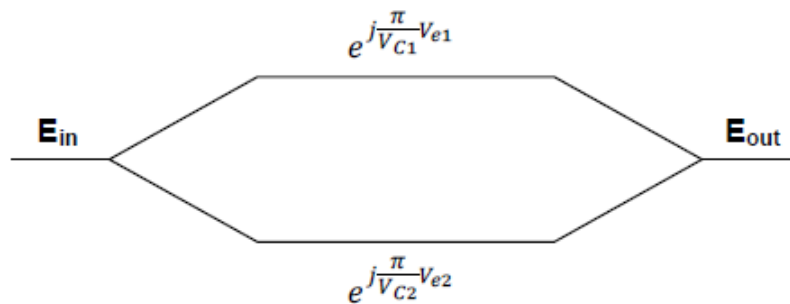


Figura 7 – Comportamiento del campo eléctrico a través del modulador Mach-Zehnder

En la figura 8 se puede observar dos imágenes pertenecientes a dos configuraciones de funcionamiento del Mach-Zehnder, primero una correspondiente al modo básico de funcionamiento, llamado *Single-drive*, seguido de otra configuración también habitual, que es la *Dual-Drive*. En la primera configuración se consigue anular el *chirp* mientras que en la segunda no se anula este parámetro, pero se consigue que sea ajustable.

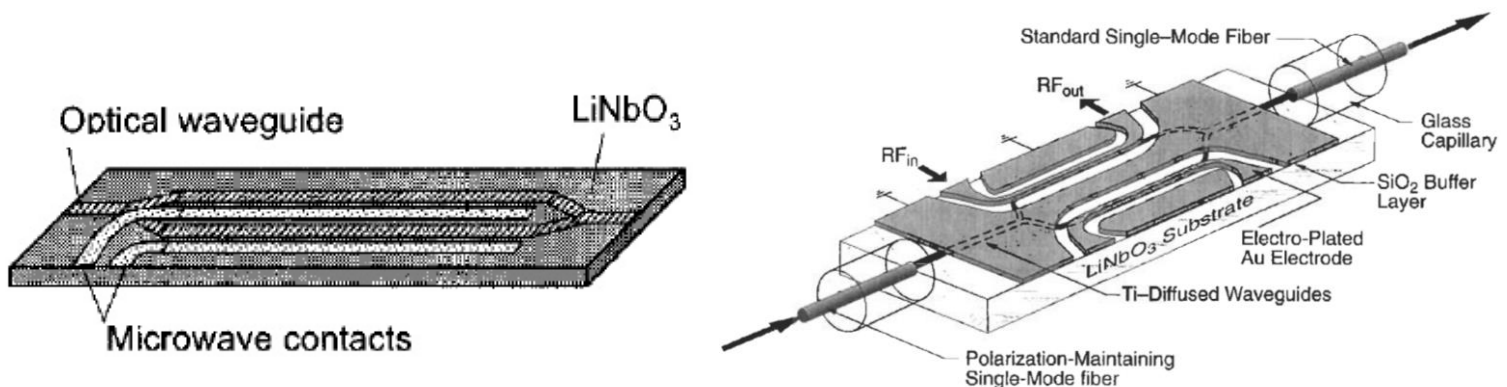


Figura 8 - Esquema del MZM configurado en single-drive (izquierda) y en dual-drive (derecha). [2]

Como se puede observar en la figura 7,  $V_{e1}$  y  $V_{e2}$  se corresponden respectivamente al voltaje aplicado a cada rama del modulador y por otra parte  $V_{c1}$  y  $V_{c2}$  se corresponden a las sensibilidades de cada una de las ramas, con lo que podemos unir ambas expresiones y obtener la siguiente ecuación que describe el campo eléctrico a la salida del modulador ( $E_{out}$ ) relacionándolo con el campo a la entrada ( $E_{in}$ ).

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2} \left( e^{\frac{V_{e1} * \pi}{V_{c1}}} + e^{\frac{V_{e2} * \pi}{V_{c2}}} \right) \quad (1)$$

Dentro de la configuración en modo Single-drive, una de las maneras más comunes de trabajar con el modulador es el modo Push-Pull que consiste en aplicar señales opuestas en fase y sensibilidades iguales en ambas ramas del modulador, con lo que se tienen las siguientes equivalencias.

$$V_{e1} = -V_{e2} = V_e \quad ; \quad V_{c1} = V_{c2} = V_c = 2 * V_{\pi} \quad (2)$$

Con lo que la expresión de campo eléctrico queda de la siguiente manera:

$$E_{out} = E_{in} * \cos \left( V_e * \frac{\pi}{V_c} \right) \quad (3)$$

Finalmente, considerando que la potencia se obtiene elevando el campo eléctrico al cuadrado, tenemos la expresión de la potencia teórica a la salida del MZM.

$$P_{out} = P_{in} * \cos^2 \left( V_e * \frac{\pi}{V_c} \right) = \frac{P_{in}}{2} \left( 1 + \cos \left( \frac{2 * \pi * V_e}{V_c} \right) \right) \quad (4)$$

Además, si se considera como parámetro de referencia la tensión de media onda ( $V_{\pi}$ ) es posible reescribir la anterior ecuación a una forma más acorde a lo utilizado en el proyecto.

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2} \left( 1 + \cos \left( \frac{\pi * V_e}{V_{\pi}} \right) \right) \quad (5)$$

A partir de esta ecuación, es posible obtener la función característica de transferencia del modulador en función del voltaje aplicado en cada una de las ramas, es decir de la tensión de polarización del mismo:  $V_{bias}$ , la que se puede observar en la figura 9.

Es importante mencionar la función que cumple el valor  $V_{\pi}$ , el cual es un parámetro fundamental del modulador ya que al tratarse de una función periódica, es la tensión mínima de alimentación que se necesita para poder abarcar todos los valores posibles de potencia de salida, siendo normal, como se observa en la gráfica, poder cubrir hasta 2 o incluso más veces este valor.

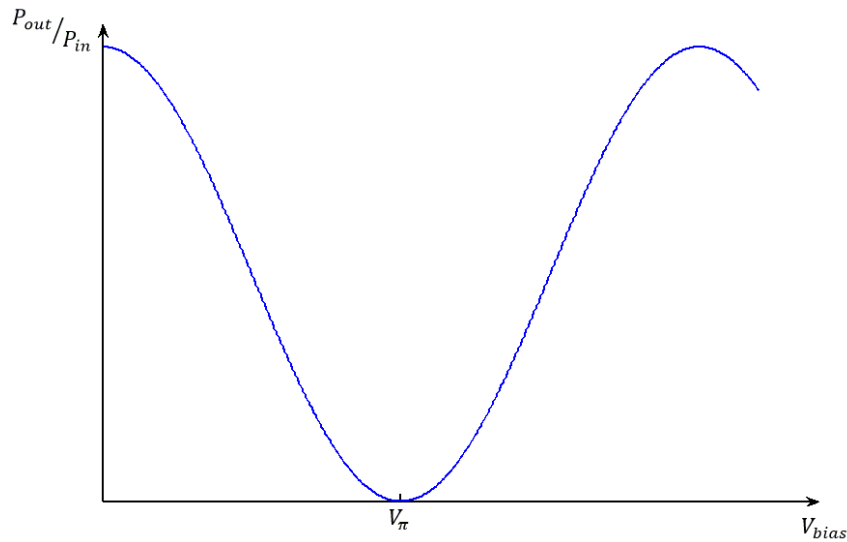


Figura 9 - Función de transferencia del modulador Mach-Zehnder

A partir de esa gráfica es desde donde se comenzó con el trabajo, ya que debido a las características del material del que constan los moduladores, estos valores no son constantes y a medida que se utiliza el modulador y se producen cambios en el entorno, como por ejemplo ligeras fluctuaciones de temperatura ya sea ambiental o debidas al propio calentamiento del instrumento estos varían. Por lo tanto para obtener valores fiables en las aplicaciones que se realicen utilizando este instrumento, es necesario conocer en todo momento en que punto de trabajo se encuentra y, si es necesario, corregirlo o modificarlo a voluntad.

### 2.3. Técnicas de control del punto de trabajo del modulador Mach-Zehnder

Al inicio del trabajo, se desarrolló el documento “Estado del arte” parte del cual puede ser consultado en *Anexo 1 - Estado del arte: Técnicas de control del punto de trabajo* [3], [4], [5], [6]. A continuación únicamente se hablará de la técnica que se implementó.

#### 2.3.1. Técnica de control para cualquier punto de polarización en un MZM

La técnica toma como punto de partida, la fórmula práctica de la potencia de salida ( $P_{out}$ ) en un modulador Mach-Zehnder en función de la potencia de entrada ( $P_{in}$ ), con una señal de *dithering* añadida que se utilizará como sistema de control, con lo que se obtiene la siguiente expresión

$$P_{out} = \frac{k * P_{in}}{2} [1 + \cos(\phi_0 + \phi_{in} + \Delta\phi)] \quad (6)$$

Que a diferencia de (5) incluye variaciones en la fase producidas por la fase de la tensión de bias ( $\phi_0$ ) y otra correspondiente a la señal de *dithering* introducida ( $\Delta\phi$ ), además un factor de atenuación  $k$  debido a las pérdidas de inserción.

Luego, si se realiza el promediado en un periodo  $T$  de la potencia para un valor concreto tanto de la señal de entrada como del *dithering*, se tiene que la potencia de salida únicamente depende de la tensión de bias.

$$\langle P_{out}(t) \rangle \sim \frac{k * P_{in}}{2} T(\phi_0) \quad (7)$$

A continuació se considera que la senyal de *dithering* com una senyal sinusoidal de freqüència angular  $\omega$  y amplitud  $A$  (normalizada al valor  $V_\pi$  del modulador) además de una fase producida por el retraso en la senyal de entrada debido a las diferencias de velocidades entre las senyales ópticas y las eléctricas:

$$\Delta\phi = A * \cos[\omega t + \theta(\omega)] \quad (8)$$

Con lo que la expresi3n general de la potencia instantánea queda:

$$P_{out} = \frac{k * P_{in}}{2} [1 + \cos(\phi_0 + \phi_{in} + A * \cos[\omega t + \theta(\omega)])] \quad (9)$$

Si se pasa esta senyal por un filtro pasa bajo, y se desarrolla la ecuaci3n resultante, se obtiene una expresi3n de la que se pueden extraer tres parámetros importantes a analizar:

- La potencia media a la salida del fotodiodo  $\langle P_{out}(t) \rangle$
- La intensidad correspondiente al primer arm3nico de la senyal de *dithering*,  $I_{1st}$
- El parámetro  $R$  que es el que relaciona ambos

Con lo que si se fija la senyal de *dithering* como un simple tono a una frecuencia determinada, se puede expresar el parámetro  $R$  dependiendo únicamente de la fase de la tensi3n de bias:

$$R = \frac{I_{1st}}{\langle P_o(t) \rangle} \cong \frac{-A \sin \phi_0}{T(\phi_0)} \cong R(\phi_0) \quad (10)$$

Este parámetro es el que se utiliza como método de control para monitorizar el modulador y poder establecer el punto de trabajo en cualquier valor de la curva de transferencia. También es importante mencionar que en el desarrollo del proyecto se trabaj3 con tensiones en lugar de potencia, con lo que aprovechando la linealidad de la conversi3n potencia óptica/tensi3n producida en los fotodiodos, se pasará a referirse a valores  $V_{out}$ ,  $V_{dith}$  en lugar de los mencionados anteriormente.



### 3. Metodología

En la introducción se habló sobre que el proyecto se dividiría en tres partes (considerando la memoria y la presentación aparte) siendo estas la red de adaptación (hardware), código para el sistema de control (software) y pruebas del sistema (testeo). Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto se fue modificando ligeramente este método de trabajo, quedando de la manera que se detallará a continuación.

#### 3.1. Visualización de la implementación

Tal como se comentó antes, se optó por la técnica de control para cualquier punto de trabajo, así que el objetivo del proyecto consistía en controlar el punto de trabajo del MZM mediante la constante monitorización tanto del valor de la intensidad de la salida ( $V_{out}$  o señal de radiofrecuencia RF) como de la amplitud de la señal de dithering introducida ( $V_{dith}$ ), siendo relacionadas ambas en el parámetro  $R$ .

Cada vez que el dispositivo se ponga en marcha, será necesario realizar un barrido por todo el rango de valores de  $V_{bias}$  para poder tener una caracterización completa de todos los valores tanto de  $V_{out}$  como de  $V_{dith}$ , lo que implica todos los valores posibles de  $R$ , y poder asociar cada uno de estos valores a un determinado valor de  $V_{bias}$ , obteniendo el resultado presentado en la figura 10.

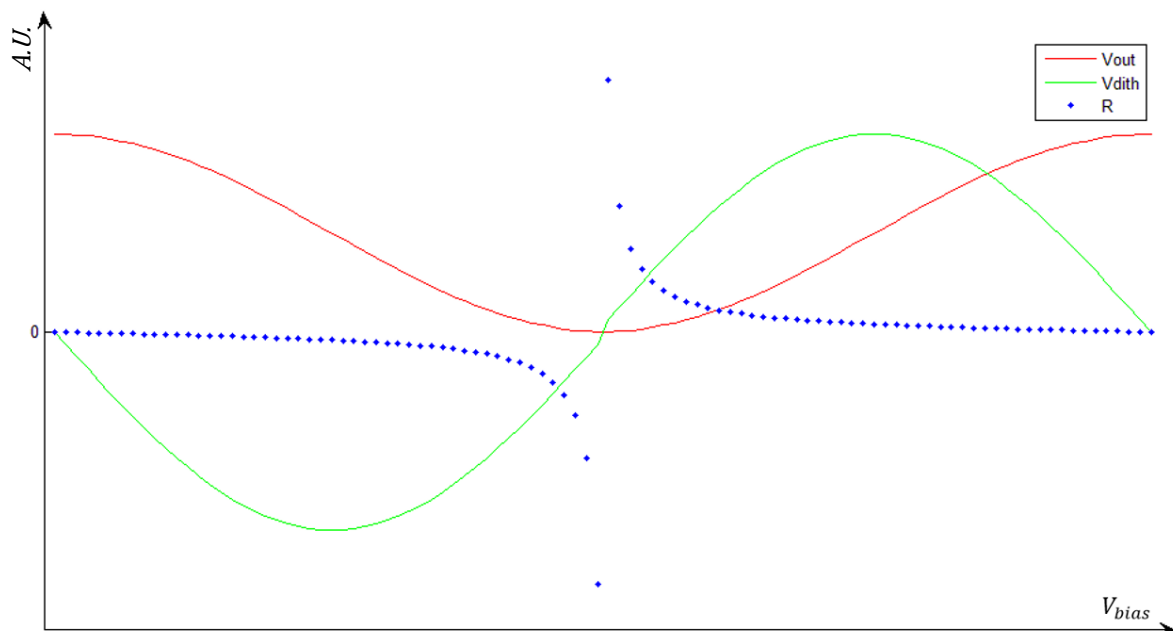


Figura 10 - Caracterización de potencia a la salida, amplitud de la señal de dithering y parámetro  $R$

Se optó por utilizar como centro de cómputo del prototipo una placa Arduino DUE, la que se eligió principalmente por contar con dos pines que se pueden configurar como conversores digital-analógico (DAC) además de por su gran potencia de cálculo y velocidad de respuesta.

Esta placa recibirá en sus pines configurados como conversores analógico-digital (ADC) una señal procedente del MZM la cual contendría un valor de continua, que se



correspondería a la potencia de la señal de entrada, y otra sinusoidal a 1 kHz de frecuencia que representa el *dithering*.

Ambas señales deberán ser separadas e introducidas en la placa por pines diferentes para su posterior procesamiento. De estos valores se extraerá el parámetro R que es con el que internamente se decidirá si se ejecutará alguna acción o se mantendrán los valores.

A la salida de la Arduino se obtendrán nuevamente dos valores de tensión, por una parte un valor de continua que será el valor de la tensión de polarización del MZM ( $V_{bias}$ ) mientras que por otro lado una señal sinusoidal a 1 kHz y de pequeña amplitud que hará la labor de *dithering*.

Después de realizar la caracterización inicial, se establecerá un valor de tensión de polarización deseado, asociándole un valor de R. Después el sistema entra en modo de monitorización, volviendo a capturar valores y obtener un nuevo parámetro R, cada cierto tiempo, el cual se comparará con el establecido al inicio y en función de la variación de este (incremento o disminución) se pasará a ajustar la tensión de bias hasta obtener de nuevo el valor establecido al inicio.

A simple vista, se podría pensar que este proceso de reajuste podría realizarse únicamente considerando la potencia de la señal de entrada, sin embargo, al tratarse la función de transferencia de una señal periódica, fijado un punto cualquiera como punto de trabajo, sería imposible deducir con exactitud si una variación fue producida por un incremento de la tensión de bias o en su defecto por una disminución de la misma, ya que esto dependería del lugar en el que se ubique el punto de trabajo. Ello implicaría conocer de antemano la respuesta en valores absolutos del MZM y esta quedaría invalidada al trabajar en entornos fuera de los establecidos por el fabricante, ya que ligeras fluctuaciones de la temperatura ambiental provocan variaciones en estos valores.

Es por eso que se introdujo la señal de dithering como una señal sinusoidal acoplada al valor de continua de  $V_{bias}$ , ya que según el modelo de funcionamiento del MZM, la amplitud del dithering irá cambiando según el punto en el que se encuentre, siendo máxima en módulo en los valores intermedios (puntos de cuadratura) y mínima en los puntos máximo y mínimo de esta función.

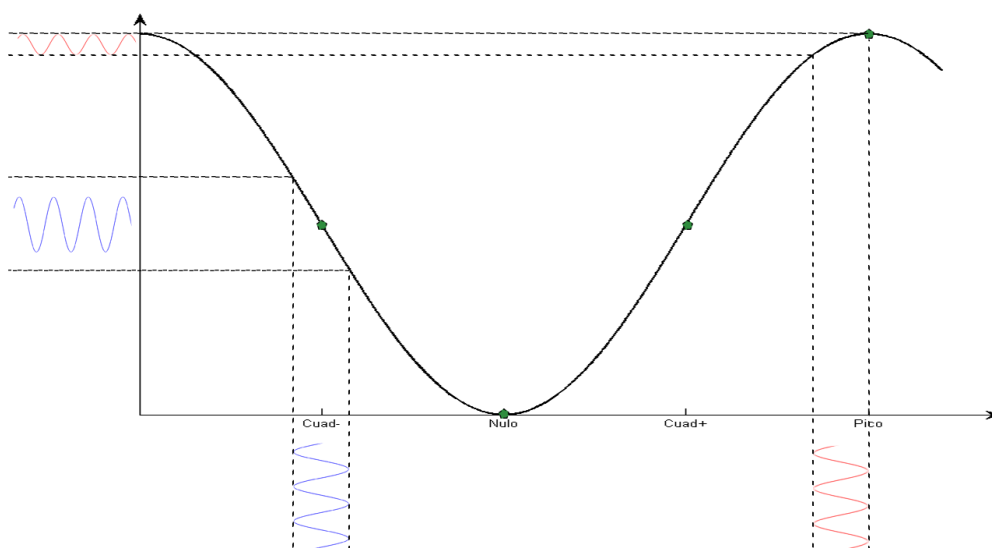
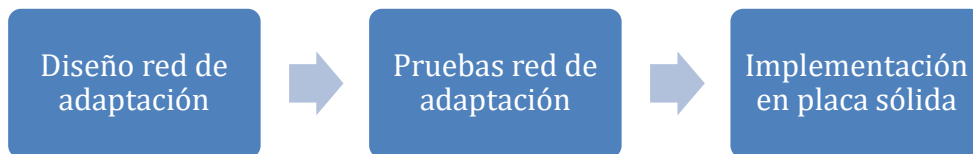


Figura 11 - Evolución de la amplitud del dithering en función del punto de trabajo

Los valores observados en la figura 11 también pueden ser comprobados en la figura 10, donde además como se observa en el parámetro R una tendencia decreciente, que nos indica hacia qué lado de la curva se movió el punto de trabajo.

### 3.2. Hardware

El trabajo realizado correspondiente a la parte de hardware, se dividió en tres partes:



*Figura 12 - Trabajo realizado correspondiente a la parte Hardware*

#### 3.2.1. Diseño de la red de adaptación

Esta parte del trabajo se realizó en paralelo con el diseño del algoritmo y la escritura del código del programa que se implementaría en la placa Arduino con el fin de optimizar el tiempo de trabajo y acceso al laboratorio.

Mientras se estudiaban las especificaciones técnicas, tanto de los instrumentos del laboratorio como de la Arduino, quedó patente los diferentes rangos de valores y tipos de señales que cada uno de ellos generaba como salida y aceptaba como entrada, por lo tanto para una óptima comunicación entre ellos sería necesaria una interfaz intermedia para adaptar las señales a los requisitos de cada uno de los instrumentos. Estos primeros requisitos incluyen la atenuación de los valores obtenidos a la salida de la conversión óptico-eléctrica del fotodiodo conectado a la salida del MZM con tal de que sean compatibles con el rango de entrada de la placa Arduino que trabaja con valores de entre 0 y 3.3 V. También era necesaria la amplificación de los valores de salida en los DAC de la Arduino para satisfacer las necesidades de alimentación del MZM, recordando que  $V_{\pi}$  es un valor elevado y como se comentó antes es necesario abarcar entre dos y tres periodos de esta señal, con lo que el rango de valores que el prototipo debe ser capaz de abarcar es elevado, llegando en este caso hasta 17 V.

Además de esta modificación de valores, también era necesario realizar un filtrado a la salida del fotodiodo para poder separar por un lado el valor correspondiente a la potencia de la señal de entrada, valor en continua, y por el otro la amplitud de la señal de *dithering* situada a la frecuencia de 1 kHz. Con este fin se diseñaron tres circuitos: dos filtros y un inversor, tal como se refleja en la figura 13.

Un filtro paso-bajo (1) RC básico cuyo objetivo es filtrar señales por encima de los 150 Hz y únicamente dejar pasar la componente de continua correspondiente al valor de la señal RF, cuya salida iba directamente a un pin configurado como ADC de la placa Arduino para luego ser procesado.

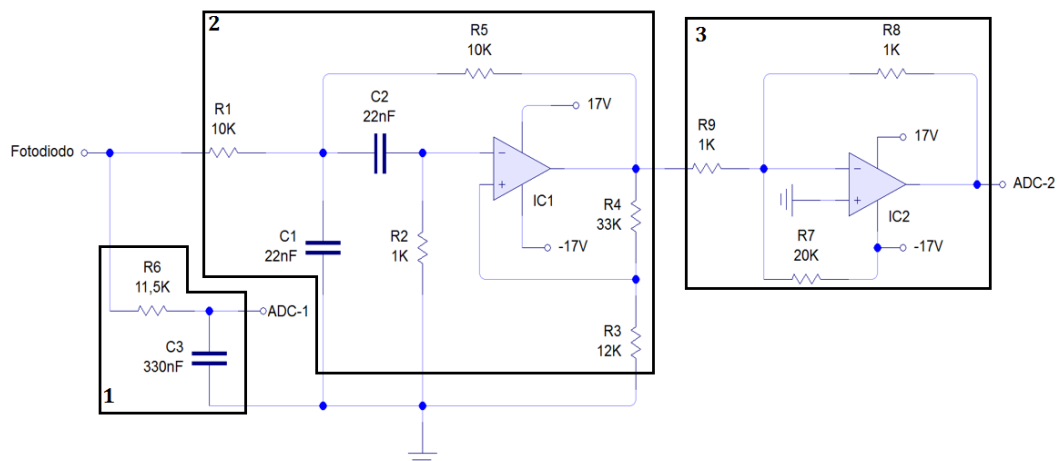


Figura 13 - Circuito de entrada a la placa Arduino

El diseño del filtro paso-banda (2) fue complejo, ya que debido a pequeñas oscilaciones producidas por el fotodiodo además de que la amplitud de la señal de *dithering* era muy pequeña y por tanto sensible a interferencias externas, era necesario contar con un filtro muy discriminativo y con una gran amplificación en la banda de paso, por eso se optó por un filtro con diseño KRC, ya que la retroalimentación positiva que este posee hace que la señal en torno a la frecuencia central se vea reforzada, con lo que se consigue el objetivo deseado.

Finalmente se implementó un inversor-sumador (3) ya que la señal de salida del filtro KRC es una versión invertida de la entrada, con lo que dado el rango de valores de la placa Arduino, es necesario volver a invertir la señal e introducir un cierto valor de tensión de offset con tal de tener unos valores dentro del rango de los 3.3 V.

En lo que a la salida de la placa Arduino se refiere, se diseñaron cinco circuitos, con el resultado de la figura 14.

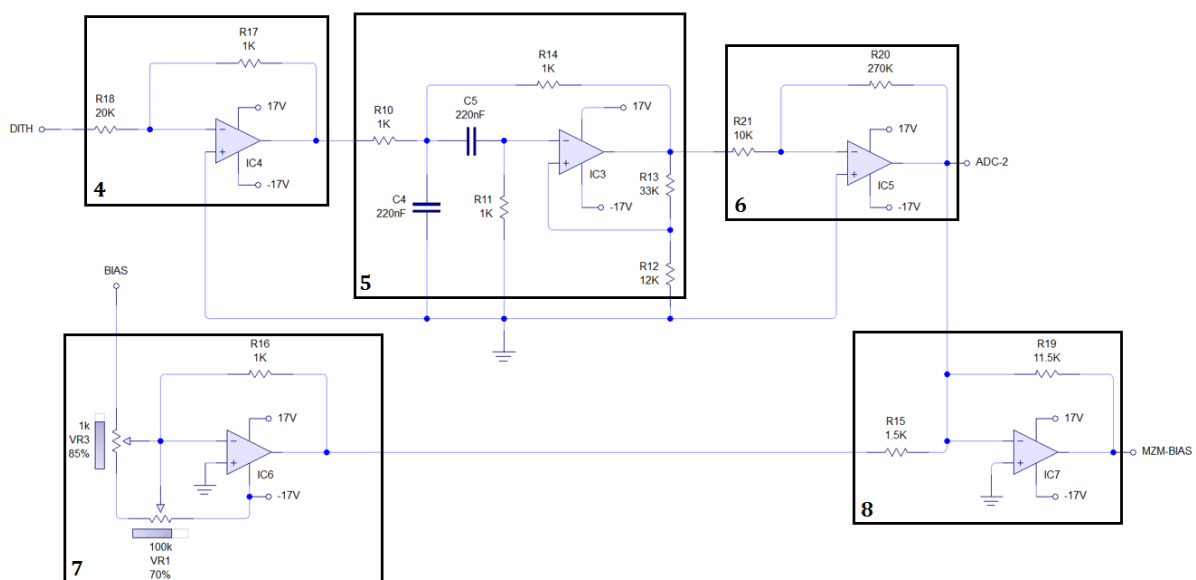


Figura 14 - Circuito de salida de la placa Arduino

Era necesario un circuito amplificador (7) a la salida de uno de los ADC de la placa para poder abarcar el rango de valores deseados para polarizar el MZM. Además, debido a que los valores reales de salida de los conversores digital-analógico de la placa no comprendía el rango completo de 0 a 3.3 V, si no que comenzaba en 0.7 V hasta 3 V, para que al amplificar mantenga la linealidad, es decir que al fijar internamente un valor de 0 V, a la salida se tengan los mismos 0 V y al aplicar 3 V se consigan los 17 V, era necesario un circuito restador para rebajar el nivel de continua de la señal. También se observa la utilización de dos potenciómetros, los cuales sirven para regular el margen de valores a la salida. Con la configuración establecida en la figura 14, se obtienen valores de 0 a 17 V, sin embargo variando estos dos potenciómetros es posible conseguir un rango inferior de valores con tal de dar mayor estabilidad al sistema.

En el apartado relativo a software se explicará la generación de la señal de dithering y el motivo por el que fue necesario incluir un nuevo filtro KRC (5). Se optó por este diseño por la mismas razones que a la entrada, además de dos circuitos atenuadores conectados antes y después de dicho filtro, el primero necesario para reducir la amplitud de la señal que entraría al filtro KRC ya que como se comentó antes, este cuenta con una gran amplificación en la banda de paso y si la señal no se atenúa haría que el circuito entre en oscilación. El segundo circuito atenuador (6) además cumple con la función de volver a invertir la señal.

Finalmente era necesario acoplar ambas señales, con lo que se diseñó otro circuito sumador (8), el cual también se aprovechó para rebajar el nivel de continua de la señal de *dithering* (por los mismos motivos que los explicados para la salida del ADC).

### 3.2.2. Pruebas de la red de adaptación

En lo que se refiere a la prueba de los elementos de la red, esta se fue realizando gradualmente en una placa *protoboard*. A medida que se decidían los valores teóricos de los componentes a utilizar y se encontraba su valor comercial más cercano, se realizaban las pruebas y una vez se había comprobado el correcto funcionamiento de cada elemento, éste se conectaba con los circuitos siguientes para comprobar el funcionamiento del conjunto entero.

Las pruebas referentes a la parte de la entrada se realizaron inicialmente utilizando un generador de funciones y comprobando sus resultados en un osciloscopio. Inicialmente se optó por utilizar diseños pasivos tanto para el paso-bajo como para el paso-banda, obteniendo buenos resultados con el generador de funciones como entrada, sin embargo cuando se hicieron las pruebas con señales menos ideales o con señales de muy pequeña amplitud, con valor elevado de continua y múltiples componentes frecuenciales (como la que procede del MZM) no se obtenían resultados óptimos, por lo que se reformuló el planteamiento del filtro paso-banda, optando finalmente por un modelo KRC y al repetir las pruebas ya con una señal procedente del MZM fue posible obtener los resultados deseados. Por otra parte el circuito sumador implementado se corresponde con el mismo que se diseñó al inicio del proyecto, variando únicamente los valores de sus componentes para ajustarse a los valores de los que se disponía.

La parte correspondiente a la salida de la placa Arduino sufrió varios cambios respecto al modelo pensado inicialmente, debido principalmente a la manera de generar la señal de

*dithering* (lo que se explicará más adelante). Al principio se pensó en generar una señal sinusoidal directamente desde la placa, y únicamente modificar la amplitud de la misma y rebajar su nivel de continua, con lo que se utilizaría un circuito sumador como el diseñado para la parte de la entrada. Sin embargo, se acabó optando por generar la señal de *dithering* a partir de una señal de modulación por ancho de pulsos (PWM) a una frecuencia de 1 kHz y un ciclo de trabajo del 50%. Para obtener la señal sinusoidal deseada era necesario filtrar la señal PWM a la frecuencia central. Primero se trató de utilizar filtros pasivos, pero los resultados eran los mismos que en la otra parte del sistema: no se filtraban correctamente las señales, por lo que se decidió optar nuevamente por el filtro KRC. Sin embargo, al contar la señal con valores de 0 V para el estado *off* y 3.3 V para el estado *on*, era necesario atenuar mucho la señal, luego filtrarla y nuevamente volver a atenuar la señal. Así, para estas dos etapas de atenuación se pensó en utilizar divisores de tensión, pero rápidamente se comprobó que estos no eran adecuados para conectarlos a la entrada de circuitos con amplificadores operacionales, como los del filtro o el sumador, así que se optó por introducir amplificadores inversores para obtener la señal deseada. En lo referente a la señal proveniente del DAC, inicialmente se utilizaron resistencias de valores estándar. Sin embargo, al ver que en ocasiones no era necesario abarcar todo el rango de valores de polarización, se decidió utilizar potenciómetros para ajustar el margen dinámico de estos valores, obteniendo buenos resultados en las pruebas en la *protoboard*, primero utilizando diferentes señales del generador de funciones y luego utilizando señales procedentes de la placa similares a la que se utilizarían para controlar la tensión de polarización del Mach-Zehnder.

Como se indicó al inicio de este apartado, para las pruebas de estos circuitos se utilizó una *protoboard*, que con todos los circuitos montados tenía el aspecto que se puede ver en la figura 15.

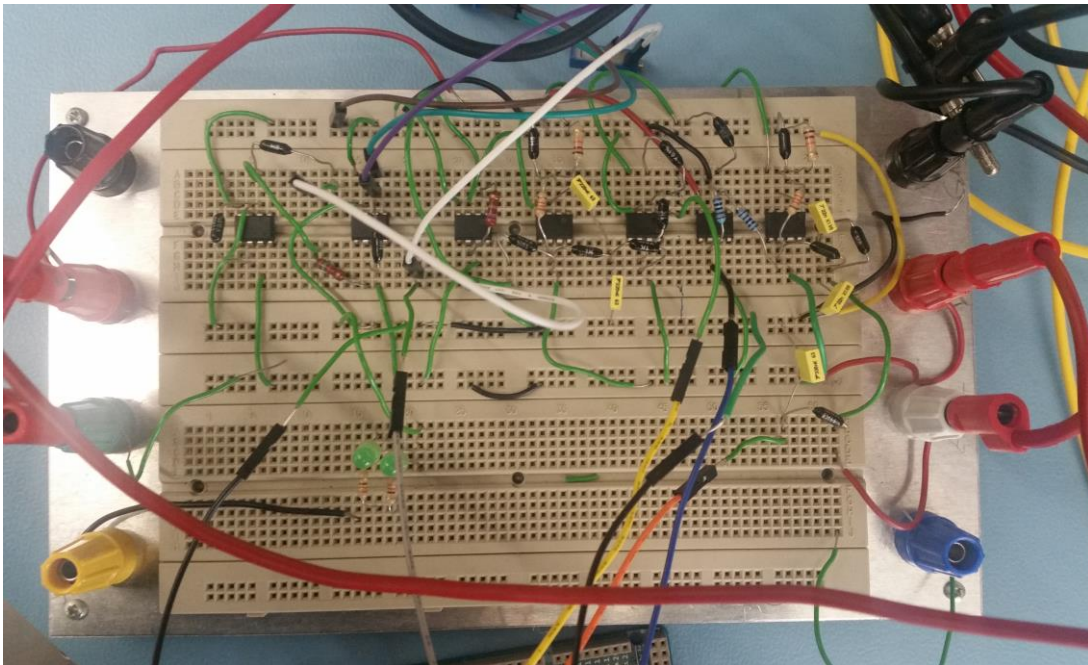


Figura 15 - Montaje de la red de adaptación en la *protoboard*



Como se ve en la imagen, hay un elevado número de cables para realizar las conexiones, lo cual sumado número de componentes y al modo de funcionamiento de esta placa, por presión, producía que en ocasiones los resultados no fueran los esperados. Ello se solucionó pasando al modelo final realizado en una placa perforada y sustituyendo los elementos móviles por soldaduras consiguiendo una mayor robustez y más fiabilidad. El esquema completo de la red de alimentación se puede ver en el *Anexo 2 - Diagrama completo del sistema implementado*.

### 3.2.3. Implementación en placa sólida

Después de comprobar que todos los componentes de la red de adaptación funcionaban correctamente en la placa de pruebas se procedió a diseñar el patrón que se seguiría en la placa soldada. Este diseño se realizó con programas de código abierto, principalmente con el software *Fritzing*, el cual además de permitir diseñar un circuito para placa sólida, también tenía algunas funciones que resultaron útiles a la hora de trabajar con la placa Arduino.

La placa se diseñó de tal forma que se minimizara el número de cables de interconexión necesarios, se instalaron las tomas de alimentación de los operacionales (9) y una toma de tierra en la zona este, en el extremo oeste se introdujeron las conexiones necesarias para la entrada del fotodiodo (10), además de otra toma de tierra (11) y el punto de acceso mediante el cual se introduciría la tensión de trabajo deseada (12), además de la salida que iría conectada al MZM (13). En la parte norte se colocó el acceso a los múltiples pines de la placa Arduino (14) para facilitar la conexión con la misma. El resultado de esto es el que se puede apreciar en la figura 16.

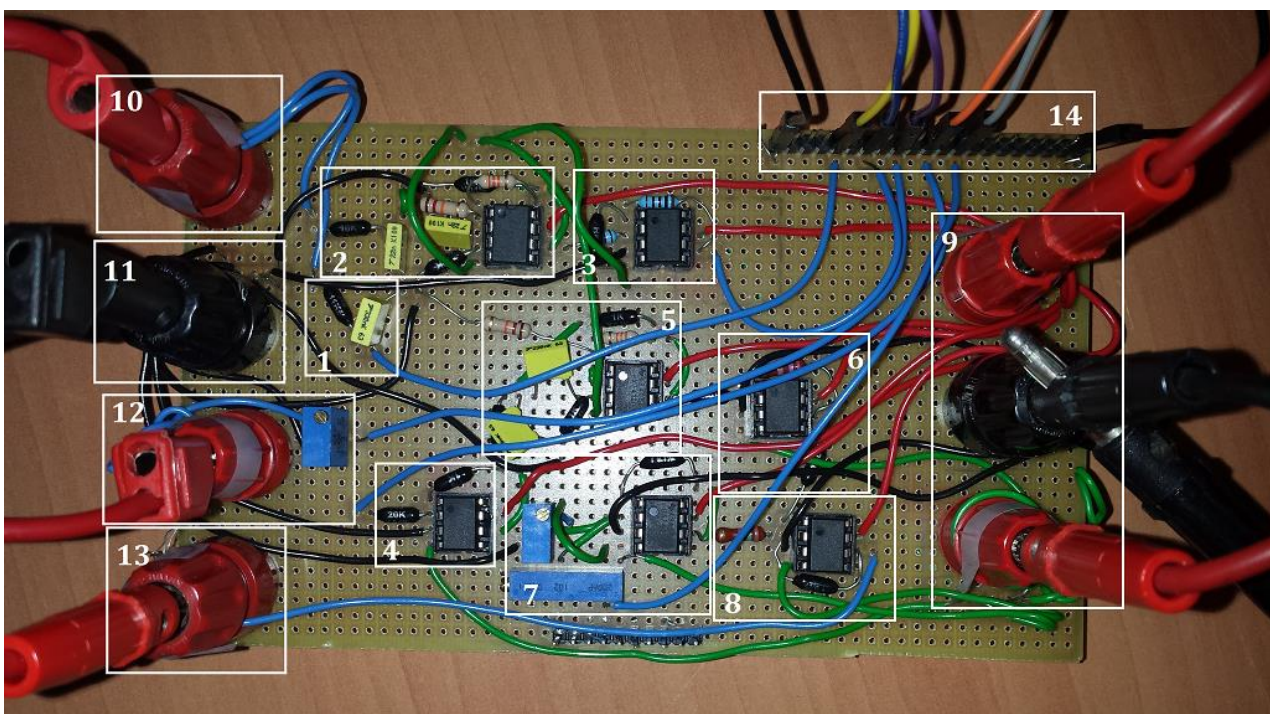


Figura 16 - Red de adaptación finalizada y conexión con la placa Arduino

### 3.3. Software

Al igual que se hizo con la parte de hardware, esta también se dividió en tres partes de trabajo.



*Figura 17 – Tareas correspondientes a la parte Software*

#### 3.3.1. Algoritmo y pseudocódigo

Se consideró que esta parte comenzó con el estudio minucioso de la técnica a implementar, ya que para estar seguros de implementarla correctamente era necesario conocerla con detalle, y a medida que se iba estudiando, iba quedando patente la necesidad de fortalecer los conocimientos relativos a las modulaciones ópticas y al MZM en general.

El diseño del pseudocódigo sufrió una evolución constante, partiendo de algunas pocas líneas hasta llegar al que se acabó implementando, debido al mejor conocimiento adquirido en el campo de trabajo. Inicialmente se contaba con separar el código en tres partes diferentes: una relativa a la captura de datos, otra en la que se realizara la caracterización de las señales enseñadas en la figura 10 y finalmente una de procesamiento de estas señales para conseguir los datos necesarios para el control.

A medida que la práctica se fue desarrollando se fue comprobando que la tercera parte era demasiado general y era necesario abordarla de otra manera, optando finalmente por dividirla en dos, la primera se implementaría junto con el resto del código, mientras que la segunda se ejecutaría aparte, quedando el algoritmo diseñado tal como aparece en la figura 18 y cuyas partes principales se detallan a continuación.

- Adquisición de datos: En todas las partes de esta sección se consideró que los datos provenientes de la placa de adaptación eran correctos y su función fue únicamente la de interpretarlos y escribirlos en la memoria ROM de la placa Arduino. Al encender el dispositivo se introducirían el número de pasos que se considerarían para llegar del valor de  $V_{bias}$  inicial al final, asociando a cada uno de estos pasos un par de valores concretos, uno correspondiente a la señal en continua y otro que representara la amplitud del *dithering* y almacenarlos en los vectores correspondientes, en la posición adecuada al número de paso.
- Caracterización de las curvas: Esta parte correspondía a completar los vectores  $P_{out}$  y  $P_{dith}$  con los valores capturados (de la señal de entrada y *dithering* respectivamente), para después obtener el vector de valores correspondiente al parámetro  $R$ , el cual era la base de esta técnica.
- Procesado de los datos: Con esto se establecería a la salida el valor de  $V_{bias}$  deseado, además de almacenar los datos asociados a este.

- Monitorización: Una vez obtenidas las curvas de funcionamiento y fijado los valores deseados para el punto de trabajo, se accedería a esta subrutina, la cual se ejecutaría en un bucle infinito, ya que mientras el dispositivo esté encendido, siempre estaría analizando los datos para el control del MZM. Cada cierto tiempo se adquirirían nuevos datos, un valor para  $P_{out}$  y otro para  $P_{dith}$ , se obtendría el correspondiente valor de  $R$  y se compararía este con el obtenido antes, en caso de ser diferentes (siempre considerando un margen de variación) significaría que el punto de trabajo ha cambiado, con lo que sería necesario corregirlo, tomando la decisión de incrementar o disminuir la tensión de bias considerando que si el nuevo parámetro  $R$  es mayor que el de referencia, se tiene que incrementar la tensión de bias, mientras que si es menor, la tensión de bias se debe disminuir, repitiendo las veces que sea necesario hasta obtener un valor que se equipare al inicial. Observando la figura 10, se evidencia que en el caso de pasar por un nulo y avanzar de izquierda a derecha, se tendría que recorrer todo un periodo de la señal de bias, lo cual considerando que se abarca casi 3 periodos de señal no debería suponer ningún problema.

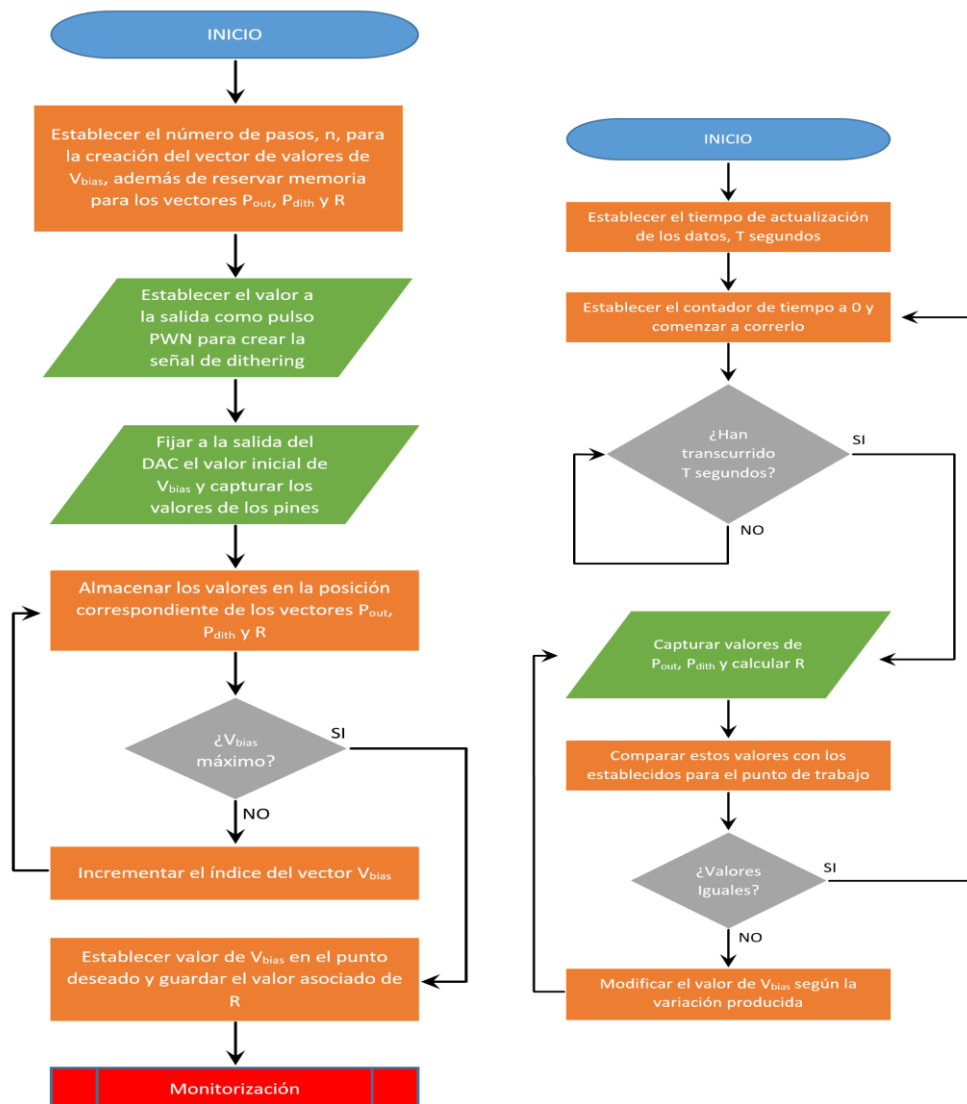


Figura 18 - Algoritmo para el sistema de control



### 3.3.2. Implementación en lenguaje *Processing*.

Una vez completado el algoritmo y teniendo en cuenta todos los posibles aspectos que pudieran variar entre el planteamiento inicial y la implementación final, se comenzó a desarrollar el código en lenguaje *Processing*.

El desarrollo siguió el mismo proceso que todo el trabajo, se desarrollaron bloques pequeños con funciones similares, se los probó individualmente y una vez verificado su funcionamiento y corregido los posibles errores que tuvieran, se pasó a combinarlos con el bloque siguiente, realizando nuevamente el mismo proceso, y así hasta completar el código del programa.

El primer paso del programa es determinar cuántos valores tomará la tensión de bias para llegar desde 0 a 4095 (valores máximo y mínimo que equivalen a 0 y 3.3 voltios). También se reserva espacio de memoria para dos vectores de la misma longitud, en los que se almacenará los datos adquiridos. La adquisición de datos se programó considerando posibles oscilaciones en los valores, ya que se observó que a pesar de tomar buenas medidas, era posible que el valor capturado presentara un pico inesperado en el momento de tomar la medida, con lo que contar únicamente con un valor podría provocar un error. Es por eso que para cada una de las medidas a tomar se capturan 10 valores diferentes (tanto para potencia como para el *dithering*) y se realiza una media de todos, además de excluir medidas que se alejen demasiado del valor medio del resto de capturas y descartar por completo la medida, en caso de que más de un tercio de los valores sean descartados (a partir de 4 valores). Para realizar este proceso en el caso del *dithering*, es necesario además capturar un periodo completo de la señal que, considerando la frecuencia de muestreo de la Arduino y la frecuencia del *dithering*, está compuesto por 400 muestras. De entre estas muestras se busca tanto el valor máximo como el mínimo, se cogen 2 valores contiguos (en ambas direcciones) y con estos se realiza una media, para obtener el máximo y el mínimo de la señal, a partir del cual se extrae la amplitud pico a pico, que es la que se almacena en un vector parcial, con el cual se realiza lo mismo que con las medidas de potencia óptica, repitiendo el mismo proceso las veces que se haya establecido en el número de pasos hasta terminar un ciclo completo de valores de  $V_{bias}$ .

Una vez se ha conseguido caracterizar estos valores, y obtener un vector completo tanto de  $P_{out}$  como de amplitud de *dithering* se pasa a crear el vector R. La obtención de este valor no puede realizarse directamente realizando una división, ya que es posible que algún valor de  $P_{out}$  sea 0, con lo que se produciría un error crítico al tratar de dividir un valor por este. Por ello al inicio se busca si existe esa posibilidad y, en caso de que así fuera, se substituye ese valor por uno ligeramente superior con tal de evitar dividir por 0. También se lee el valor introducido en el pin de captura de tensión de bias (realizando el mismo proceso que antes), se lo compara con los valores de  $V_{bias}$ , se elige el más cercano y se lo establece a la salida, guardando los valores de R asociados a este. Para generar la señal sinusoidal inicialmente se pensó en generarla calculando los coeficientes necesarios y reproducirlos periódicamente. Sin embargo en las primeras pruebas se observó que no se podía generar una señal a 1 kHz ya que el tiempo que se tardaba en ejecutar las instrucciones siguientes a la generación de la señal, hacía imposible que esta quedara bien definida, con lo que se optó por generarla mediante una señal PWM y filtrarla analógicamente.

Con el valor establecido, se entra en la parte principal del programa: la parte de monitoreo, que se ejecutará siempre que el dispositivo esté encendido. Se define un tiempo de actualización, tras el cual se tomará una nueva medida, tanto de  $P_{out}$  como de la amplitud del dithering, se obtendrá el parámetro  $R$  asociado a estos y se lo comparará con el guardado al final de la etapa anterior, si estos parámetros coinciden, no se realizará ninguna acción y se volverá a esperar a que se cumpla el tiempo de actualización para tomar una nueva medida. En caso de que los valores sean diferentes se actuará en función de la variación. Es decir, si el valor de  $R$  ha disminuido significa que el desplazamiento de la curva de trabajo ha sido hacia la izquierda, por lo que el punto de trabajo actual, se corresponde a un valor superior, por lo tanto se disminuye la tensión de bias hasta que el valor de  $R$  capturado vuelva a coincidir con el que se estableció al inicio. El caso es análogo para un valor mayor y ambos quedan expresados en la figura 19. El código completo puede verse en *Anexo 3 - Código para la placa Arduino*.

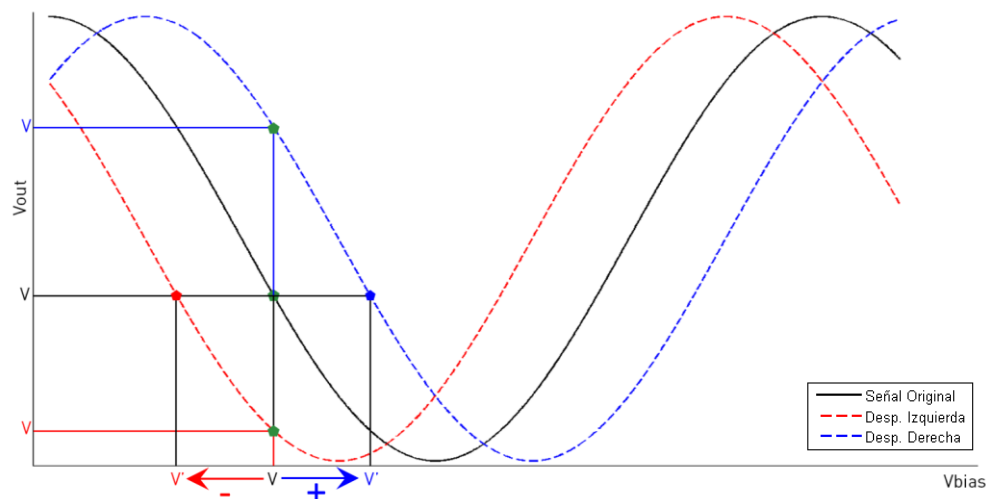


Figura 19 - Método de decisión y corrección

### 3.3.3. Pruebas con el modulador Mach-Zehnder

El montaje utilizado para las pruebas del sistema de control es el de la figura 20.

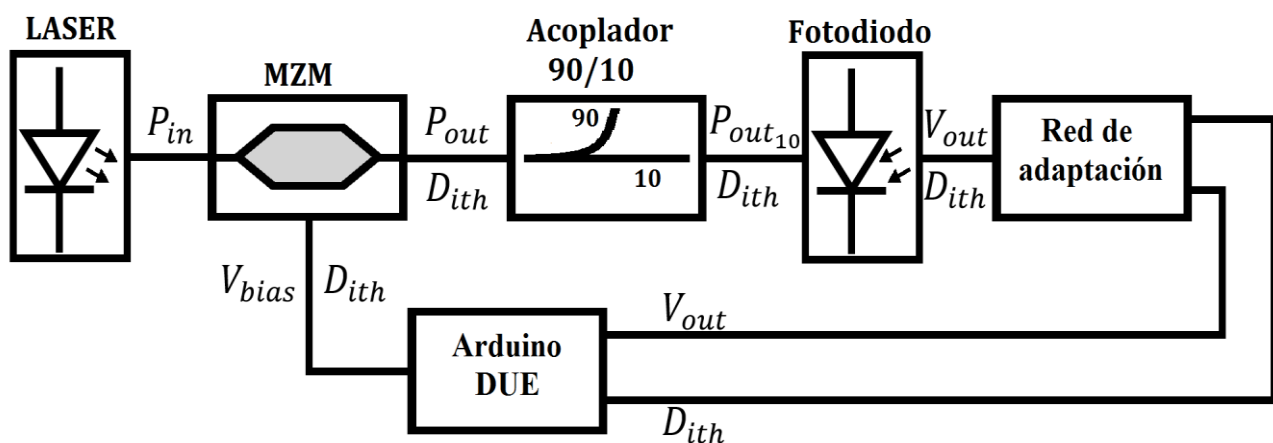


Figura 20 - Esquema del montaje experimental

Después de verificar el correcto comportamiento del código, capturando señales producidas en el osciloscopio y estableciendo tensiones para alimentar los propios amplificadores, se pasó a realizar las primeras pruebas con el modulador, las cuales se dividieron en tres partes: comprobar que la captura y caracterización de los vectores se realizaba correctamente polarizando el MZM con un generador de señales, comprobar que la captura y caracterización eran correctas con la señal producida por la placa y finalmente verificar si a lo largo del tiempo, la compensación de la tensión se hacía correctamente.

El mayor inconveniente y limitante externo del proyecto es debido al fotodiodo, ya que al realizar la conversión óptico-eléctrica de valores cercanos al límite mínimo con el que trabaja, se producen grandes oscilaciones en los valores obtenidos, haciendo imposible trabajar con ellos. Por lo tanto, en consenso con el tutor del trabajo, se procedió a limitar el margen de trabajo a únicamente un periodo, en el que gracias a la periodicidad de la función de transferencia, se logran abarcar casi todos los puntos de trabajo posibles.

Además, otro problema proveniente del fotodiodo fue que realizaba la conversión óptico-eléctrica en valor absoluto, con lo que no se podían capturar valores negativos, lo que llevó a cambiar ligeramente el método de corrección, ya que la forma del parámetro  $R$  variaría y se tendría que decidir en qué zona se encuentra el punto de trabajo, a la derecha o izquierda del máximo de potencia, ya que dependiendo de esto se tendría que invertir el método de corrección explicado antes. Estos resultados se pueden comprobar en la figura 21.

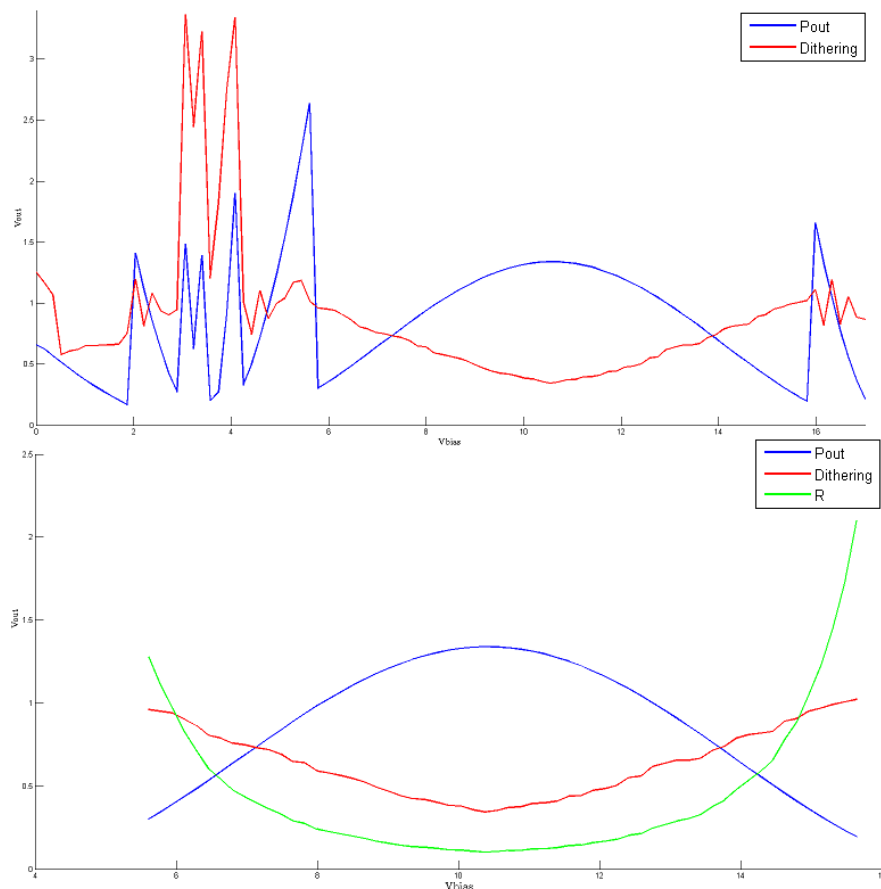


Figura 21 - Curvas capturadas antes y después de procesarlas

## 4. Resultados

Como se comentó en anteriores apartados, el proceso de desarrollo del proyecto fue evolutivo, partiendo del diseño e implementación de pequeños módulos individuales, siguiendo con su integración en elementos más complejos hasta llegar al modelo final en el que se consiguió controlar el punto de trabajo del modulador óptico Mach-Zehnder.

En las prácticas realizadas en los laboratorios del CTTC se utilizó un láser modelo *Tunics Reference* de la marca *NetTest*, el fotodiodo integrado en el multímetro de la marca *Agilent* modelo 8163-A y con moduladores de la marca *Photline* y *EOspace*, además de un acoplador óptico 90/10. Todas las pruebas se realizaron en tercera ventana (longitud de onda de 1550 nm) con fibras multimodo y con una potencia en el láser de 5 dBm. Además se utilizaron los siguientes valores: 100 pasos para tensión de bias (que debido al recorte que sufre la señal se quedan en aproximadamente 70); rango de valores de 0 a 17 V, tiempo de refresco para la monitorización 30 segundos.

La configuración utilizada para los experimentos comienza con el láser conectado al modulador el cual a su vez es polarizado por la señal proveniente de la placa diseñada, la cual recibe la señal que envía el fotodiodo cuyos valores provienen de la salida del modulador.

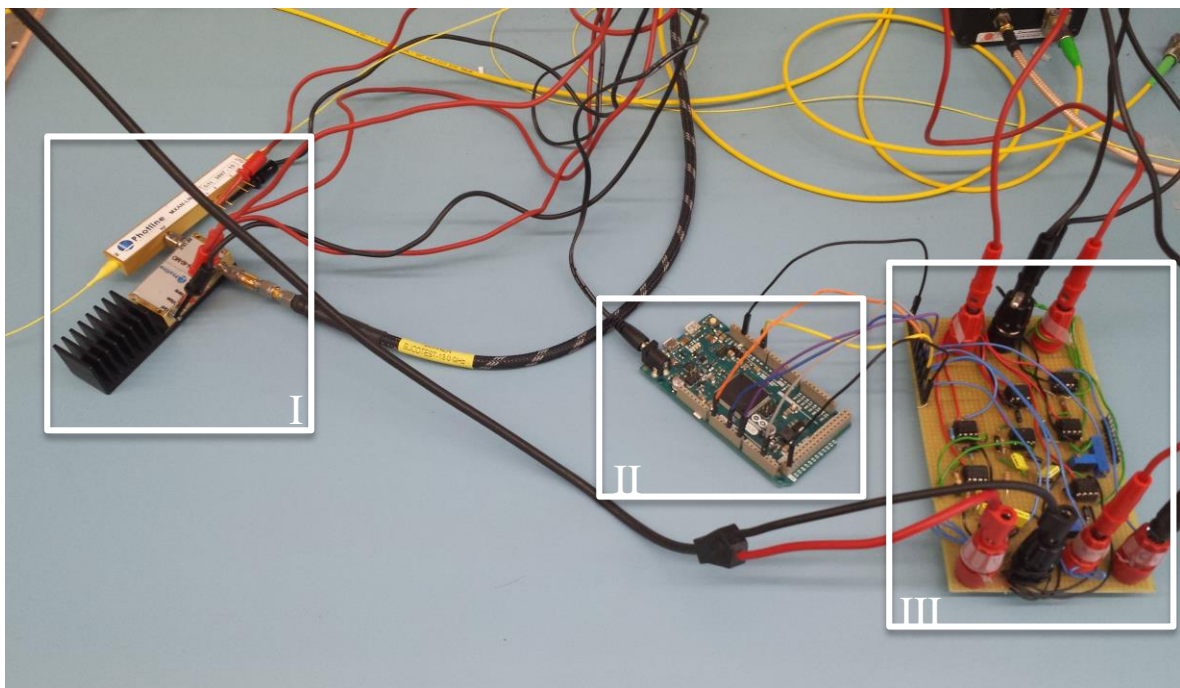


Figura 22 - Circuito de trabajo, con el modulador Mach-Zehnder de Photline (I), la placa Arduino (II) y la red de adaptación diseñada (III).

Durante el desarrollo de la práctica también se utilizó un generador de funciones para sustituir la alimentación que provenía de la placa Arduino, un osciloscopio óptico para comprobar que la polarización mediante la placa era correcta y un osciloscopio digital en paralelo a la salida del fotodiodo para comprobar que las medidas tomadas en la Arduino se correspondían con las realizadas por este instrumento.

Durante los primeros días de prueba, únicamente se trabajó con las primeras partes del código, captura y caracterización, con el objetivo de comprobar como afectaba el paso del tiempo y las variaciones de temperatura a las oscilaciones del modulador, se dejó corriendo el código durante el día, reiniciándose cada 10 minutos para capturar una nueva tanda de valores y al final de la jornada se pudo evidenciar las variaciones en la función de transferencia del modulador.

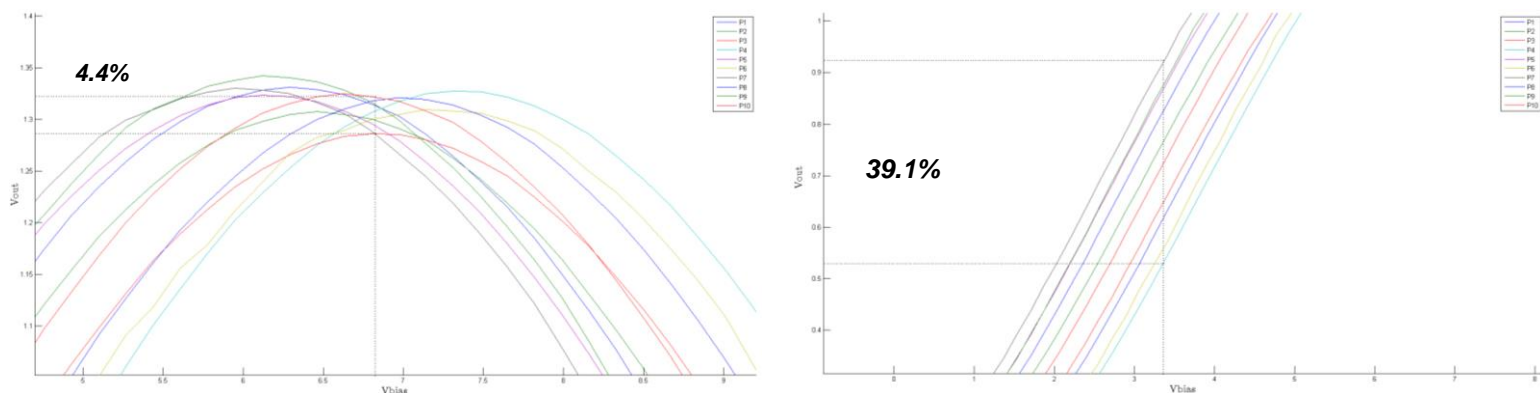
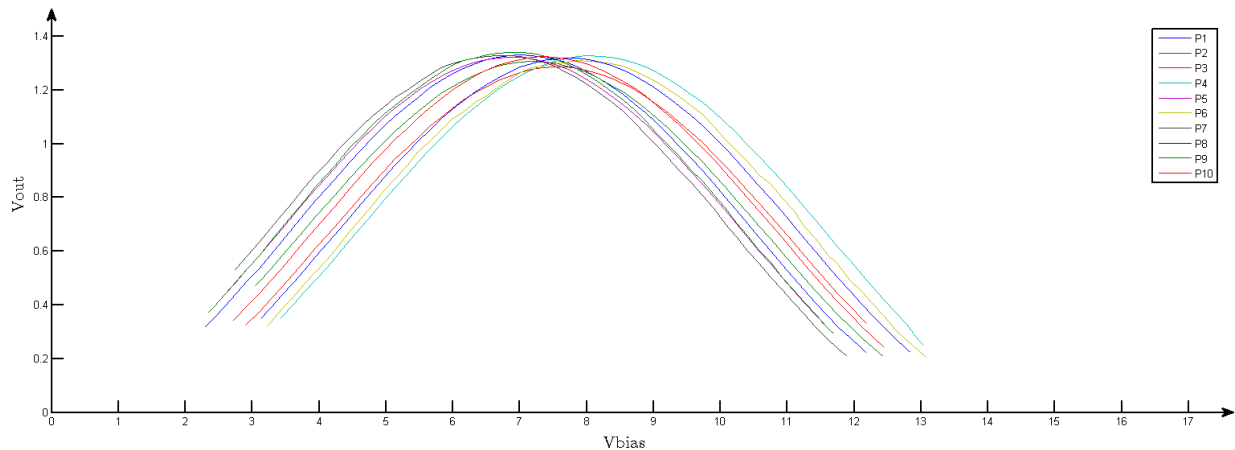


Figura 23 - Variación de la función de transferencia en un modulador Mach-Zehnder

Tal y como se observa, la fluctuación del valor de bias, provoca una variación máxima del 39.1% en la curva de salida del MZM para un punto cercano al de cuadratura en flanco ascendente (teniendo un valor similar para el flanco descendente), y la menor variación corresponde a valores cercanos a un máximo, donde la fluctuación llega al 4.4%. En los resultados obtenidos se encontraron valores aún superiores, sin embargo solo se contabilizaron aquellos que suministraban al menos la mitad de muestras válidas que estuvieran incluidas en un periodo completo, debido a la necesidad de recortar los datos obtenidos que se comentó en el apartado 3.3.3.

Con este resultado en mente, se comenzó a probar el sistema, repitiendo las mismas pruebas durante un periodo de tiempo similar, pero esta vez con el código al completo, para comprobar así el funcionamiento del sistema desarrollado.

Es necesario indicar que para esta parte del trabajo el código se modificó, ya que en su versión funcional únicamente debe realizar la caracterización completa una vez (la inicial) sin embargo para comprobar su funcionamiento, se pasó a instaurar un nuevo

controlador de tiempo, que es el encargado de redirigir el programa a la rutina de captura y caracterización.

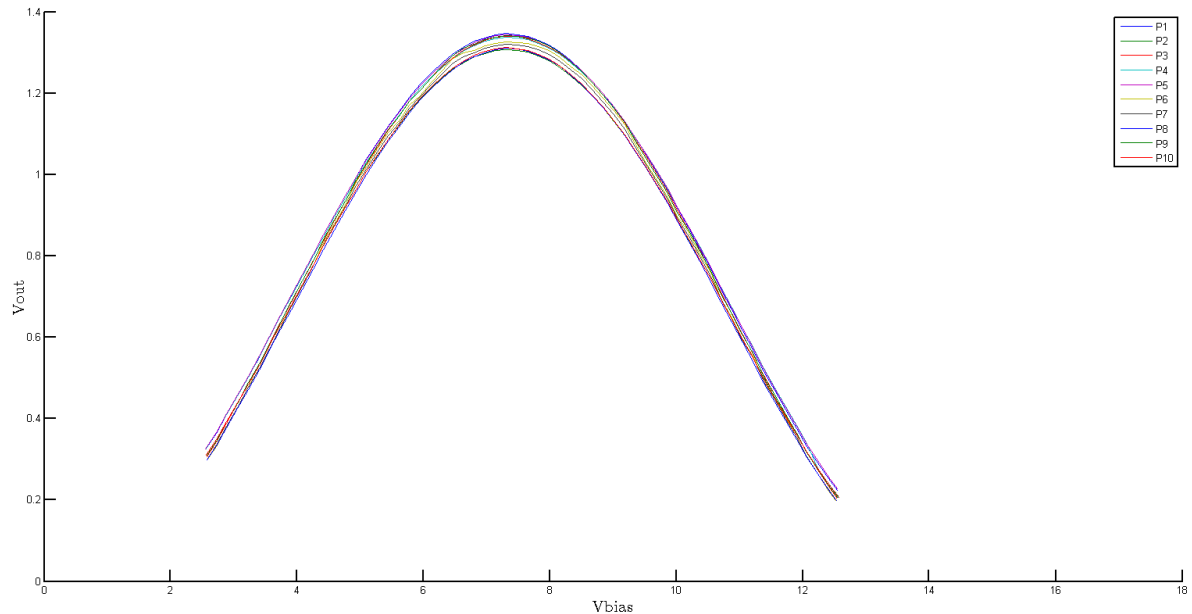


Figura 24 - Señales capturadas con el sistema de control en funcionamiento

Para esta representación también se utilizó 10 señales capturadas en diferentes periodos de tiempo, siendo visible la mejora en comparación al resultado enseñado en la figura 23 siendo la figura 25 una visión más detallada del mismo, mostrando tanto el valor mínimo como el máximo de variación debido a la fluctuación de la tensión de polarización.

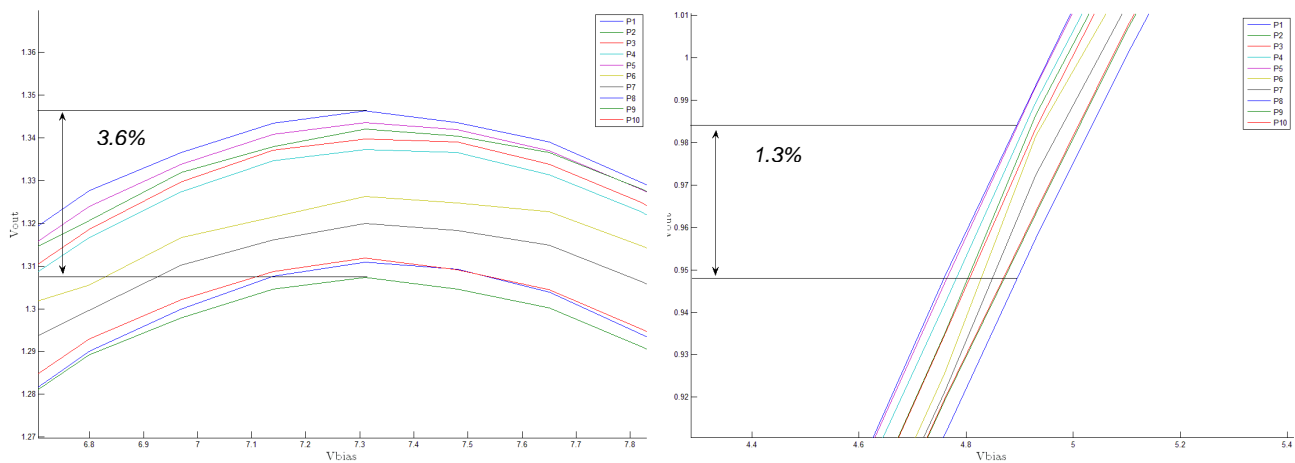
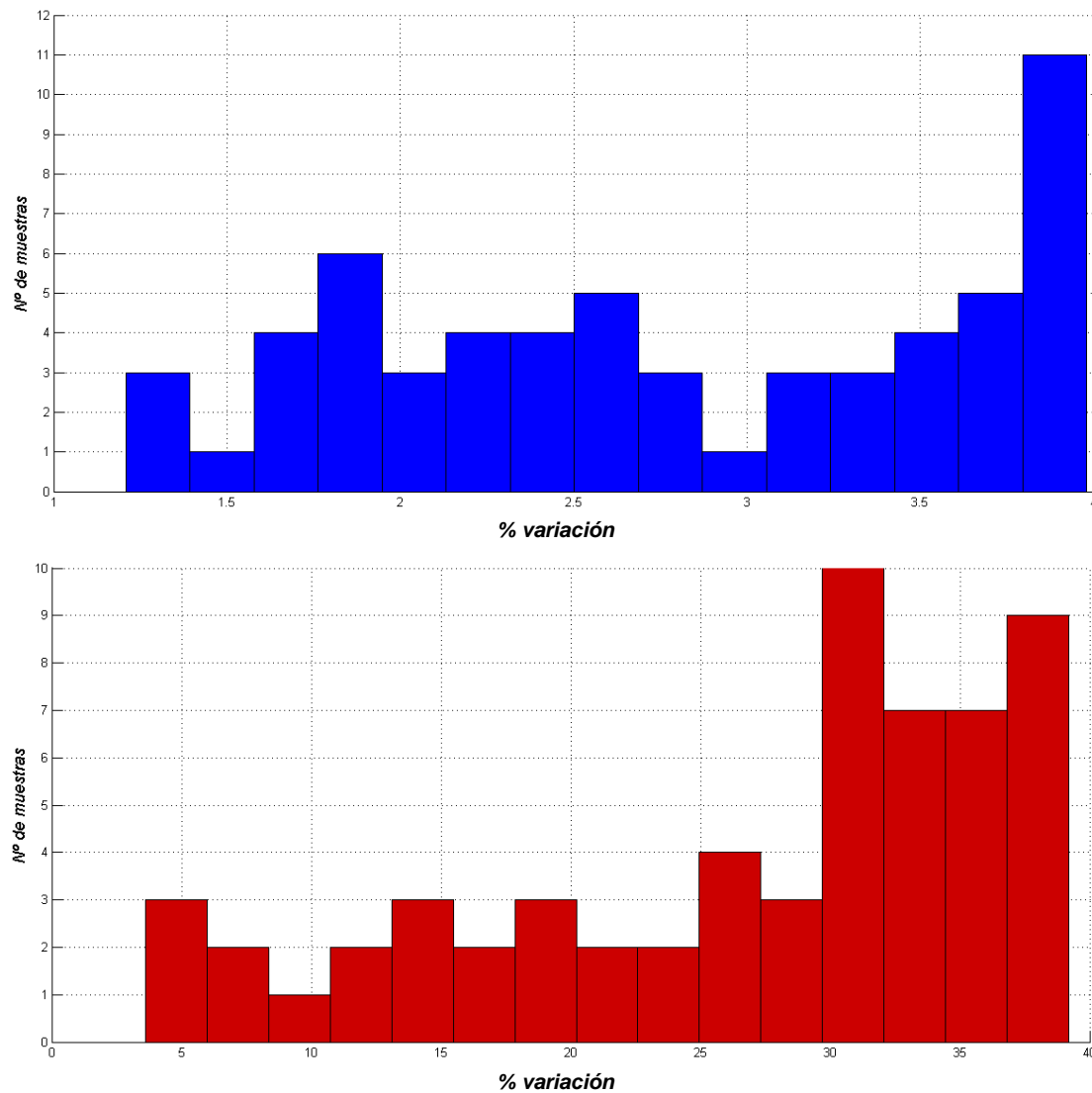


Figura 25 - Variaciones máxima (izquierda) y mínima (derecha) de las variaciones en los valores de salida del MZM

Estos resultados se observan con más detalle en los histogramas representados en la figura 26.





*Figura 26- Variación en las medidas con el sistema implementado (superior) y sin el sistema de control (inferior)*

Los datos representados en la figura 26 se obtuvieron calculando el valor mínimo y el máximo de tensión medido en cada uno de los puntos de tensión de bias para cada una de las curvas capturadas, y dependiendo de la diferencia entre estos se calculó el porcentaje que esta representa respecto a la amplitud de la señal. Para representar los histogramas, se siguió el mismo procedimiento para el modulador con y sin el sistema de control en funcionamiento, en estas gráficas queda más detallado lo que se apreciaba en las figuras 23 y 24, donde se podía observar que sin el sistema se producían variaciones máximas del 39% mientras que con el sistema de control en funcionamiento el máximo de variación es inferior al 4%, mientras que la fluctuación mínima pasa de ser del 5% a valores cercanos al 1%.

## 5. Conclusiones y futuro desarrollo:

Tal como se aprecia en la figura 26, se pasó de variaciones cercanas al 40% a valores aproximadamente 10 veces menores, lo que demuestra un correcto funcionamiento del sistema diseñado además de su utilidad para estabilizar un modulador óptico, con lo que se considera que el objetivo de este proyecto se consiguió.

Algo importante a remarcar es que al contrario del modulador trabajando sin sistema de control, cuando se introduce el sistema diseñado, es que la mayor variación se produce en los valores máximos, lo que es debido al método utilizado para procesar los datos, ya que al realizar la caracterización del *dithering* en función de los máximo y mínimos de esta señal, se consiguen valores extremadamente fiables en las zonas donde se tiene una máxima amplitud, sin embargo, en las zonas cercanas a máximos, se producen demasiadas variaciones al tratarse de una señal extremadamente pequeña (unos pocos mV de amplitud) que puede fácilmente camuflarse con interferencias externas o con las provocadas por los operacionales utilizados, es por eso que a pesar de que los resultados obtenidos son buenos, uno de los principales métodos de mejora de esta técnica es la adquisición de los datos.

También se evidenció las relativas limitaciones de la placa Arduino utilizada, ya que a pesar de ser una herramienta potente, está limitada si no se cuentan con varios elementos de E/S con los que poder conectarla. Para el desarrollo del proyecto, sobre todo para las partes iniciales en las que era necesario estar pendiente todo el tiempo de la caracterización, se necesitaba un ordenador cercano al prototipo para controlar los datos que la placa iba proporcionando.

Por tanto, como futuro desarrollo (aparte de mejorar el método de captura y contar con un fotodiodo que no realice la conversión en módulo) sería interesante añadir algunos de los módulos (*shields*) de los que dispone Arduino, tales como una pantalla LCD para visionar los datos en tiempo real sin necesidad de tener un ordenador conectado a la placa, una tarjeta SD ya que debido al gran espacio necesario para caracterizar los vectores, se tuvo que limitar el tipo de variables de cálculo utilizadas, lo que de cierta forma también limitó algunas opciones de procesado además de poder almacenar los datos capturados para, si es necesario, estudiarlos a posteriori. También se podría integrar la red de adaptación en un circuito impreso e integrarla junto con la placa Arduino a una estructura sólida con tal de optimizar el espacio disponible en el laboratorio.



## **Bibliografía**

- [1] Y. Li, Y. Zhang, Y. Huang. "Any bias point control technique for Mach-Zehnder Modulator". IEEE photonics technology letters, vol 25, No. 24, Diciembre de 2013, p 2412-2415.
- [2] F. Heismann, S. K. Korotky, and J. J. Veselka. *Lithium niobate integrated optics: Selected contemporary devices and system applications*. Nueva York, EUA: NewYork: Academic, pp 377-462, 1997.
- [3] K. Sekine, C. Hasegawa, N. Kikuchi, S. Sasaki, "A novel bias control technique for MZ modulator with monitoring power of backward-light for advanced modulation formats". OFC/NFOEC, Marzo de 2007.
- [4] H. G. Choi, Y. Takushima, H. Y. Choi, J. H. Chang, and Y. C. Chung, "Modulation-format-free bias control technique for MZ modulator based on differential phasor monitor" OSA/OFC/NFOEC, 2011.
- [5] P. S. Cho, J. B. Khurgin, I. Shpantzer. "Closed-loop bias control of optical quadrature modulator". IEEE photonics technology letters, vol 18, No 21, Noviembre de 2006, pp 2209-2211.
- [6] T. Yoshida, T. Sugihara, K. Uto, H. Bessho, K. Sawada. K. Ishida, K Shimizu, T. Mizouchi. "A study on automatic bias control for arbitrary optical signal generation by dual-parallel Mach- Zehnder modulator," *36th ECOC*, Sep. 2010.
- [7] L. L. Wang, T. Kowalczyk. "A versatile bias control technique for any-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators," *Journal of lightwave technology*, vol 28, No 11, Junio de 2010 pp. 1703-1706.
- [8] Y. Fu, X. Zhang, B. Hraimel, T. Liu, D. Shen. "Mach-Zehnder", IEEE microwave magazine. pp DOI: 10.1109/MMM.2013.2280332, Noviembre/Diciembre de 2013, pp 102-107.
- [9] J. P. Salvestrini, L. Guilbert, M. Fontana, M. Abarkan, S. Gille, "Analysis and control of the DC drift in LiNbO<sub>3</sub>-based Mach-Zehnder modulators," *Journal of lightwave technology*, vol 29, No 10, Mayo de 2011, pp 1522-1534.
- [10] G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*, 3a edición. Nueva York, EUA: WILEY-INTERSCIENCE, 2002.
- [11] K. Thyagarajan, A. Ghatak. *Fiber optic essentials*. 1a edición. Nueva Jersey, EUA: WILEY-INTERSCIENCE, 2007.

## **Glosario**

CTTC-Centre tecnològic de telecomunicacions de Catalunya

MZM - Modulador Mach-Zehnder

IEEE - Institute of electrical and electronics engineers

IM-DD - Modulació de intensidad y detección directa

OOK – Modulació On-Off Keying

EOM – Modulador electroóptico

EAM – Modulador de electroabsorción

RF - Señal de radiofrecuencia

DAC - Conversores digital-analógico

ADC - Conversores analógico-digital

RC - Filtro pasivo con componentes resistivos y capacitivos

KRC - Filtro activo con componentes resistivos y capacitivos, además de amplificadores operacionales para proporcionar ampliación en la banda de paso

PWM - Modulació por amplitud de pulsos